HEINY _ NAUDY _ MARTEL

TECHNOLOGIE d'électricité

TOME 5

PREMIER LIVRE

MACHINES ELECTRIQUES
TRACTION ELECTRIQUE
GENERATEURS ELECTRO-CHIMIQUES

FOUCHER . Paris

P. HEINY
Ingénieur Sous-Directeur de l'E.N.N.E.P. de Paris.

R. NAUDY
Professeur technique d'électricité de Lycée technique

L. MARTEL
Professeur de Collège d'enseignement technique

Technologie d'ÉLECTRICITÉ

TOME 5
Premier livre

MACHINES ÉLECTRIQUES
TRACTION ÉLECTRIQUE
GÉNÉRATEURS ÉLECTRO-CHIMIQUES

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli - PARIS-1er

ÉDITIONS FOUCHER

ÉLECTRONIQUE

M. MOUNIC

— **Physique électronique - Tubes à vide et à gaz**
— **Semi-conducteurs - 1re partie**
— **Semi-conducteurs - 2e partie - Transistors**
— **Semi-conducteurs - 3e partie - Thyristors**
— **Redresseurs**
— **Transistors - Problèmes avec solutions** (2 fascicules)

MOUNIC RICARD et MONFORT — **Travaux pratiques d'électronique** (4 fascicules)

P. THUREAU

— **Électronique de base à l'usage des non-électroniciens**

TINEL et DE LUCA — **Le dessin et le schéma en construction électronique**

P. MOUNIC

— **Amplification**

P. RIVÈRE — **Impulsions**

pour la préparation de vos cours

abonnez-vous à la revue : LE COURS INDUSTRIEL

128, RUE DE RIVOLI - PARIS-1er

TÉLÉPHONE : 236-38-90

Préface

L'évolution dans les domaines de l'activité humaine, n'est pas phénomène nouveau. Marc Aurèle écrivait en l'an 180 : « Tout est en cours de transformation. Toi-même aussi tu es en état de transformation continue et à certains égards de dissolution ; de même pour l'univers entier...

» L'art de vivre est plus semblable à celui de la lutte qu'à celui de la danse en ce qu'il faut se tenir prêt et sans broncher à parer aux coups directs et non prévus. »

A notre époque, les progrès des sciences et des techniques ont accéléré les transformations de toute nature et rendu plus spectaculaire leur manifestation.

L'homme doit apprendre à vivre dans cette perpétuelle évolution accélérée ; mais il rencontre de grandes difficultés à acquérir l'attitude d'esprit favorable à ce mode de vie alors que ce comportement intellectuel devrait être naturellement le sien.

S'il a le plus souvent cherché refuge dans une prudente passivité, c'est que l'organisation économique et sociale actuelle n'est plus adaptée à ses besoins et que, de ce fait, elle devient incapable de favoriser l'esprit d'entreprise et l'acceptation effective de responsabilités.

Les théoriciens de l'organisation et de l'économie ont pris de plus en plus de place dans notre société ; leur situation est apparue enviable puisque les risques qu'ils encourent sont disproportionnés en comparaison de l'importance des initiatives qu'ils ont à prendre. Les emplois qui conduisent l'homme à se heurter aux multiples problèmes de la production sont, par contre, peu recherchés.

Ainsi, les secteurs actifs de l'économie, ceux dont dépend essentiellement la place que prendra notre pays dans le concert des nations, sont délaissés par les bons élèves de nos écoles et facultés qui préfèrent les tâches administratives aux responsabilités qu'ils auraient à prendre dans les laboratoires industriels, les bureaux d'études ou les ateliers.

Le manque de curiosité de nombreux parents et enseignants pour tout ce qui touche aux problèmes de la création et la production des biens d'équipement et de consommation, a eu pour conséquence une orientation scolaire défavorable, en nombre et en qualité, à l'enseignement technique. C'est l'industrie nationale qui très prochainement aura à souffrir de cette situation et il est facile d'en prévoir les conséquences pour notre pays tout entier.

Les disciplines technologiques, méconnues de beaucoup, souffrent du préjugé défavorable, injustifié, que leur portent ceux-là mêmes qui les ignorent.

Elles possèdent cependant les mêmes vertus éducatives que celles que, traditionnellement, on qualifie de générales ; elles peuvent développer l'esprit critique, apprendre à porter un jugement, à conduire l'imagination vers la réalisation et surtout, à cause de l'expérimentation qui s'impose à chaque création, elles donnent au jeune beaucoup d'humilité, sans pour autant porter atteinte à son audace.

Les connaissances technologiques, bien qu'elles exigent une constante mise à jour, ne sont pas pour autant caduques.

L'évolution des techniques n'est pas discontinue ; elle se produit par améliorations successives qui exigent de ceux qui les suggèrent une connaissance parfaite des phéno-

mènes scientifiques du matériel étudié, de ses possibilités et de ses imperfections, ainsi qu'une imagination créatrice toujours en éveil.

Les exemples de cette lente évolution sont nombreux ; ainsi depuis son origine, le principe du moteur électrique est toujours le même ; si sa forme, ses dimensions, son régime de travail, son rendement, son prix de revient ont été améliorés, c'est que les matériaux qui le composent ont vu leurs caractéristiques se modifier, parce que sa ventilation, mieux étudiée, a été plus énergique, sa fabrication plus économique, son étude technique plus finement élaborée.

Dans une perspective différente, une centrale nucléaire ne diffère d'une centrale thermique que par le générateur de chaleur et son combustible.

Toutes deux utilisent de la vapeur pour transporter l'énergie calorifique, une turbine pour la transformer en énergie mécanique, et un alternateur pour produire l'énergie électrique.

Le cours de technologie apparaît indispensable à la formation de l'ingénieur, du technicien, de l'ouvrier, parce qu'ils sont les artisans de l'évolution technique ; ce cours est établi non seulement pour mettre en évidence le cheminement de la pensée du créateur, mais aussi pour donner une méthode d'étude du matériel, de sa fabrication, de son exploitation et surtout pour suggérer de nouvelles étapes de sa conception.

C'est dans cet esprit que MM. Heiny, Naudy et Martel, professeurs éminents de l'Enseignement technique ont écrit ce dernier tome du cours de technologie d'électricité, qui traite de la construction des machines tournantes et statiques, de l'étude des schémas des bobinages, de l'application de ces machines à la traction électrique, des générateurs électriques d'origine électrochimique, et dont un chapitre, très intéressant et utile, invite le lecteur à s'intéresser à la réalisation des bobinages, à leur réparation, et à la recherche des dérangements.

L'étude de la théorie de fonctionnement des bobinages, de leur conception, de leur construction constitue non seulement un exercice intellectuel très enrichissant et formateur mais aussi le point de départ de la recherche de machines électriques à circuits imprimés.

Cet ouvrage de technologie, dont je me plais à souligner la richesse et l'actualité de la documentation ainsi que la qualité pédagogique de la rédaction, n'a pas été écrit uniquement pour donner aux élèves le contenu du cours professé. Un tel livre n'aurait pas eu de sens. Les auteurs, qui ont le respect de la personnalité des professeurs, ne se sont pas proposé de les astreindre à leur conception pédagogique du cours. Ils ont fait de ce livre un instrument de travail dont la mission est d'apporter, aux élèves et au professeur, les compléments d'information indispensables, les documents graphiques pouvant servir de thème aux études technologiques ; il doit être, en outre, très utile au professeur chargé de l'enseignement de la construction comme à ceux qui ont la charge de diriger les travaux pratiques et la conception des schémas.

Le livre de technologie doit être également, pour le jeune, l'un des premiers ouvrages de sa bibliothèque technique, celui que l'on aime consulter parce qu'il apporte non seulement l'information mais aussi la méthode de travail et de réflexion.

Je suis certain que MM. Heiny, Naudy et Martel auront atteint le but qu'ils s'étaient fixé. Il m'est agréable de les complimenter et d'exprimer le souhait que leur livre reçoive l'accueil favorable qu'il mérite, de la part des élèves, des professeurs de l'enseignement technique et des techniciens de l'Industrie.

A. CAMPA,
Inspecteur général
de l'Enseignement technique, 1967.

MACHINES ÉLECTRIQUES

1RE PARTIE

CONSTRUCTION DES MACHINES

1. Machines tournantes

1.1. — CONSTITUTION GÉNÉRALE

Du point de vue électrique, les machines tournantes sont classées et étudiées en fonction des phénomènes mis en jeu dans leur fonctionnement interne et de la nature de la tension existant aux bornes. On est ainsi amené à distinguer :

◆ **Les machines à courant continu :**

— *génératrices*, plus généralement appelées *dynamos*, assurant la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par action d'un flux constant en grandeur et en sens sur des conducteurs mobiles ;

— *moteurs* ou machines *réceptrices* assurant la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique par action d'un flux constant en grandeur et en sens sur des courants circulant dans des conducteurs mobiles ;

◆ **Les machines à courant alternatif :**

— *génératrices synchrones*, généralement appelées *alternateurs*, assurant la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par action d'un flux constant en grandeur et en sens par rapport au système inducteur, sur des conducteurs mobiles par rapport au système inducteur ;

— *moteurs synchrones*, assurant la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique par action d'un champ magnétique tournant sur un champ magnétique lié au système inducteur ;

— *moteurs asynchrones* ou *d'induction*, assurant la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique par action d'un champ magnétique tournant sur des courants induits par ce champ tournant ;

— *génératrices asynchrones* assurant la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, obtenues simplement en entraînant un moteur asynchrone au-delà de sa vitesse de synchronisme ;

— *machines à collecteur*, dans lesquelles plusieurs des actions précédentes peuvent être en cause.

Du point de vue technologique, la classification est beaucoup plus subtile à établir, à cause de l'identité de construction qui peut exister entre des machines ayant même puissance, mais fonctionnant d'après des principes différents.

En prenant pour critère la taille de la machine, nous distinguerons, dans l'étude qui va suivre :

◆ **Les petites machines,** dont la puissance peut être fractionnaire, et, au plus, égale à une *dizaine de kilowatts* ;

◆ Les **machines de puissance moyenne,** dont l'ordre de grandeur de la puissance se chiffre par *centaines de kilowatts* ;

◆ Les **grandes machines** pouvant atteindre des puissances se chiffrant par *dizaines de milliers de kilowatts* et jusqu'à plus de 200 000 kW.

Du point de vue de la protection contre les agents extérieurs, l'U.T.E. a établi une classification faisant intervenir les différents degrés de protection (Tab. I).

Quoi qu'il en soit, nous pouvons déjà, en nous appuyant sur les principes de fonctionnement rappelés au début, établir la constitution générale d'une machine tournante. Nous trouverons toujours :

◆ **Des organes mécaniques,** ayant pour rôle essentiel :

— de *transmettre le couple* du moteur d'entraînement vers la génératrice électrique, ou du moteur électrique vers la machine réceptrice ;

— de *résister aux sollicitations internes et externes* liées aux *phénomènes de fonctionnement* ou aux *actions de la pesanteur* sur les différents organes ;

— de *protéger* la machine contre les *agents extérieurs* ;

— d'assurer sa *liaison mécanique* avec les supports environnants ;

◆ **Des organes magnétiques,** chargés de la *production* et de la *répartition du flux magnétique* ;

◆ **Des organes électriques,** constitués essentiellement par :

— les *enroulements inducteurs* ;

— les *enroulements induits* ;

— les *dispositifs de prise de courant.*

TABLEAU 1. — *Degrés de protection des machines tournantes.*

Machine ouverte.	Construite sans protection spéciale des parties sous tension, ou en mouvement, lesquelles sont accessibles au toucher. L'eau et les corps étrangers peuvent pénétrer librement dans la machine.
Machine semi-protégée.	Dont les enroulements sont partiellement protégés par la disposition du bâti et des paliers ou des couvre-enroulements. Certaines pièces sous tension ou en mouvement sont accessibles au toucher. L'eau et les corps étrangers peuvent librement pénétrer dans la machine.
Machine abritée	Pourvue de dispositifs empêchant les gouttes d'eau et les corps solides tombant verticalement de pénétrer dans la machine à l'arrêt. Certaines pièces sous tension ou en mouvement sont accessibles au toucher.
Machine protégée contre les projections obliques (en abrégé machine protégée).	Les parties sous tension ou en mouvement sont rendues difficilement accessibles ; les ouvertures sont disposées de telle sorte que la machine à l'arrêt soit protégée contre la pénétration des corps solides et les projections d'eau l'atteignant suivant une direction faisant avec la verticale un angle inférieur ou égal à 60°.
Machine grillagée.	Les orifices de ventilation sont obturés par des dispositifs à claire voie s'opposant au contact involontaire et à la pénétration de corps solides au-dessus d'une certaine dimension, quelle que soit la direction d'où ils viennent. La protection par grillage est souvent employée en protection complémentaire sur les machines semi-protégées, abritées ou protégées.
Machine protégée contre la pluie.	Machine protégée contre les projections d'eau obliques même lorsqu'elle est en marche.
Machine fermée.	Dont les orifices sont obturés par des couvercles empêchant, sans que la machine soit absolument hermétique, l'échange d'air entre l'intérieur de la machine et le milieu environnant autrement que par des joints. Les pièces sous tension ou en mouvement sont soustraites au contact accidentel ou volontaire des personnes. Les corps solides, les poussières grossières et les projections d'eau ne peuvent pénétrer dans la machine même en marche, quelle que soit la direction d'où ils viennent.

Machine fermée protégée contre les poussières fines.	Machine fermée construite de façon à empêcher, même en marche, la pénétration à l'intérieur de poussières fines en quantité suffisante pour nuire au bon fonctionnement ou à l'isolation.
Machine fermée protégée contre les jets d'eau.	Machine fermée construite de telle façon que l'eau projetée sous n'importe quel angle avec une lance, dans des conditions spécifiées, ne puisse pénétrer dans la machine, même en marche, en quantité suffisante pour en empêcher ou en gêner le bon fonctionnement.
Machine étanche à l'immersion ou machine submersible.	Machine construite de façon à pouvoir fonctionner en permanence lorsqu'elle est immergée dans l'eau à une profondeur spécifiée.
Machine étanche aux gaz ou vapeurs ou machine hermétique.	Machine construite de façon à empêcher la pénétration à l'intérieur de l'enveloppe d'un gaz ou d'une vapeur dans des conditions spécifiées de pression et de température.
Machine antidéflagrante.	Machine pourvue d'une enveloppe telle que si l'atmosphère ambiante devient explosive, une explosion se produisant à l'intérieur ne puisse ni briser ni détériorer dangereusement l'enveloppe, ni se propager à l'extérieur.
Machine à sécurité augmentée.	Machine destinée à être utilisée dans une atmosphère inflammable, dont le fonctionnement ne donne pas lieu normalement à étincelles et dans la construction de laquelle des mesures (réduction d'échauffement, augmentation d'entrefer) sont prises en vue d'éviter l'inflammation de l'atmosphère inflammable.

NOTE : une machine peut, dans ses différentes parties, comporter des protections différentes. La désignation s'effectue en énonçant d'abord le degré de protection relatif à la partie principale, puis les degrés de protection relatifs aux autres parties, en précisant les organes auxquels ils se rapportent, exemple : moteur à sécurité augmentée, à bagues antidéflagrantes.

1.2. — ORGANES MÉCANIQUES

Le tableau II indique les fonctions assurées et les conditions auxquelles doivent répondre ces différents organes.

TABLEAU II. — *Organes mécaniques et fonctions assurées.*

Fonction	Conditions à remplir	Désignation de l'organe
Transmettre le couple. **Supporter le circuit magnétique mobile.**	Résister au couple de torsion. Résister à la flexion.	Arbre.
Guidage de l'arbre.	Centrage radial. Centrage longitudinal. Graissage.	Paliers.
Support des paliers	Alignement des paliers.	Flasques.
Support du circuit magnétique fixe.	Centrage du circuit par rapport à l'axe de rotation. Résistance au couple de réaction produit par le circuit magnétique tournant. Eventuellement protection du circuit magnétique et de certaines parties de bobinage.	Carcasse. Dans les machines à courant continu, la carcasse est confondue avec une partie du circuit magnétique fixe.
Refroidissement des enroulements et circuits magnétiques.	Assurer un débit d'air (ou autre gaz) suffisant pour évacuer les pertes ; Guider le gaz de refroidissement sur les parties à refroidir.	Ventilateur.
Fixation.	Maintien de la machine sur son support ; Résistance aux couples de réaction provoqués au démarrage et en marche normale par les circuits tournants sur les circuits fixes.	

1.21. — ARBRE

Du point de vue des efforts mécaniques, l'arbre est soumis à des couples de torsion variables avec la charge de la machine et à des efforts de flexion dus à l'attraction de la pesanteur et aux effets centrifuges. Pour résister à ces contraintes, il doit présenter la plus faible longueur et la plus grosse section compatibles avec les dimensions de la machine.

Il est en acier dont la charge de rupture se situe dans les machines courantes, vers 700 N/mm^2.

Des épaulements permettent le montage de tous les organes annexes : roulements, blocs de bagues ou collecteurs, ventilateurs, manchons d'accouplements ou poulies. Les différentes portées sont rectifiées, si nécessaire, de façon à améliorer le degré de précision et l'état de surface. La présence de ces épaulements lui confère une forme favorable pour la résistance à la flexion (*fig.* 1).

Le blocage en rotation des différents organes est assuré par un emmanchement dur à la presse, un clavetage, ou par les deux systèmes combinés. Le blocage en translation du côté opposé à l'épaulement est assuré par des systèmes divers : écrous, circlips, joncs.

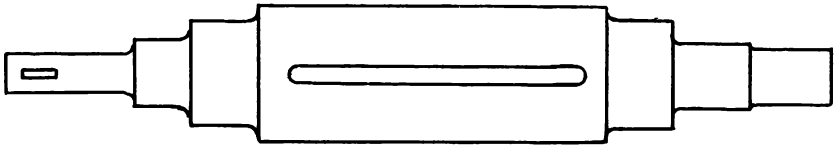


Fig. 1.

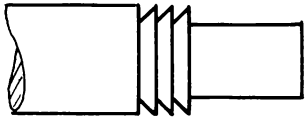


Fig. 2.

Dans le cas des machines munies de paliers à coussinets lisses lubrifiés à l'huile et démunies de joints d'étanchéité, on arrive à éviter les projections d'huile du côté interne de la machine, en effectuant des saignées sur l'arbre (*fig.* 2). Les gouttelettes d'huile sont soumises à la force centrifuge et guidées par la face oblique de la saignée jusqu'à l'intérieur des boîtes à huile.

Dans les machines de faible et moyenne puissance, l'arbre est généralement usiné directement dans la barre. Dans certains cas particuliers, en traction

électrique notamment, il peut être creux et réalisé en acier coulé (*fig.* 3).

Dans le cas des turbo-alternateurs et des alternateurs de grande puissance pour usines hydrauliques, des dispositions spéciales modifient quelque peu le caractère de l'arbre. Les différentes solutions seront étudiées en même temps que les circuits magnétiques pour flux constants.

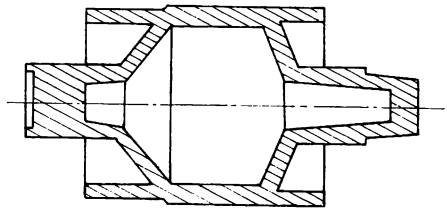


Fig. 3.

1.22. — CARCASSE

Les carcasses de machines à courant continu assurent le passage du flux produit par les pôles inducteurs et constituent, de ce fait, un véritable circuit magnétique. Elles seront étudiées dans le chapitre traitant des circuits magnétiques fixes pour flux constants. Nous n'envisagerons donc ici que le cas des machines dont le circuit magnétique fixe est parcouru par un flux variable.

1.221. Machines de puissance fractionnaire.

Il est très fréquent que la carcasse soit complètement supprimée. Les tôles du circuit magnétique sont simplement serrées par quelques rivets et elles servent de centrages aux flasques paliers (*fig.* 4). Le refroidissement du circuit magnétique est excellent puisque les tôles sont en contact direct avec l'air. Les flasques peuvent également recouvrir complètement la surface latérale extérieure des tôles et tenir lieu de système de protection (*fig.* 5).

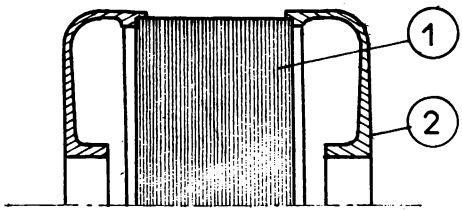


Fig. 4. — 1. Tôlerie.
2. Flasque.

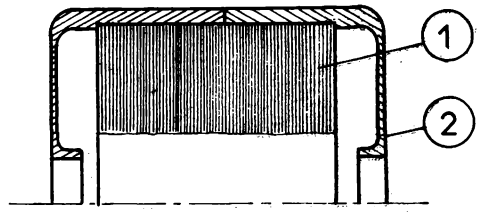
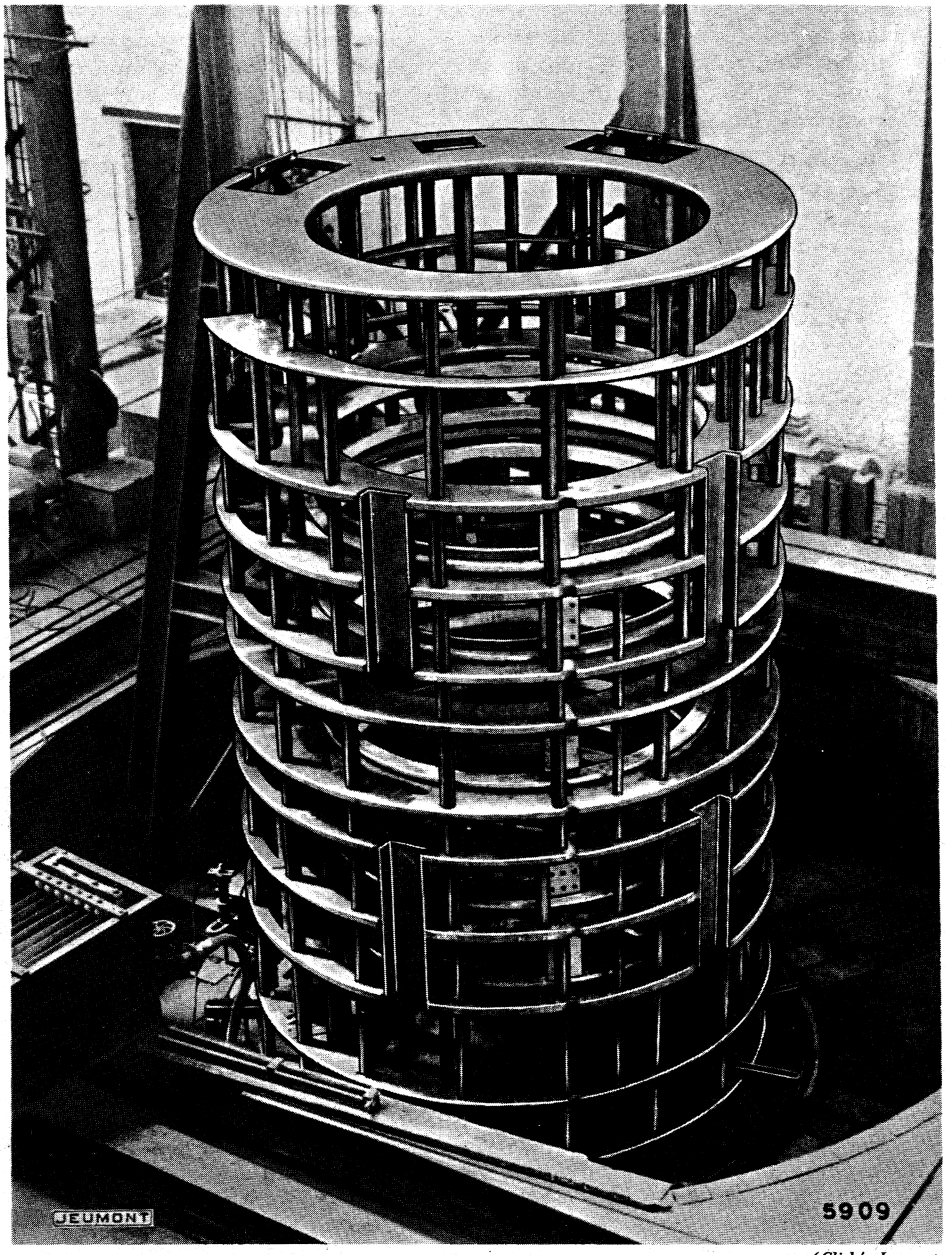


Fig. 5. — 1. Tôlerie.
2. Flasque.



(Cliché Jeumont.)

Fig. 7. — Carcasse de turbo-alternateur en cours de montage.

1.222. Machines de petite et moyenne puissances.

◆ **Carcasses en alliage léger.**

Dans les petits moteurs de construction moderne, la carcasse est coulée directement sur le paquet de tôles, celui-ci servant en quelque sorte de noyau à l'intérieur de la coquille de coulée. De telles carcasses peuvent être munies d'ailettes destinées à augmenter la surface de rayonnement. L'évacuation des pertes fer est réalisée au mieux, par le contact intime entre les tôles et la carcasse (*fig.* 6).

◆ **Carcasses à nervures intérieures.**

Le principe de montage est indiqué sur la *figure* 7. La présence des nervures évite un usinage de la carcasse sur toute la périphérie intérieure. La ventilation est facilitée par le passage de l'air de refroidissement dans l'intervalle compris entre la tôlerie et la carcasse.

De telles carcasses s'exécutent rarement en alliage léger coulé, et, dans ce cas, toujours pour des faibles puissances (inférieures à la dizaine de kilowatts). Dans les cas les plus courants d'utilisation, elles sont en fonte avec des nervures venues de fonderie ou en tôle d'acier roulée et soudée, avec des nervures rapportées par soudage. Elles sont alors utilisées jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts.

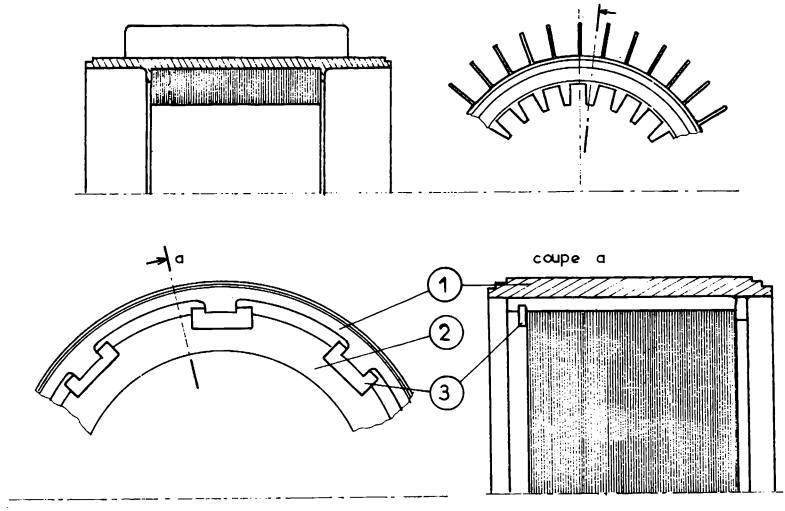


Fig. 6. — 1. Carcasse.
2. Tôlerie.
3. Clavette.

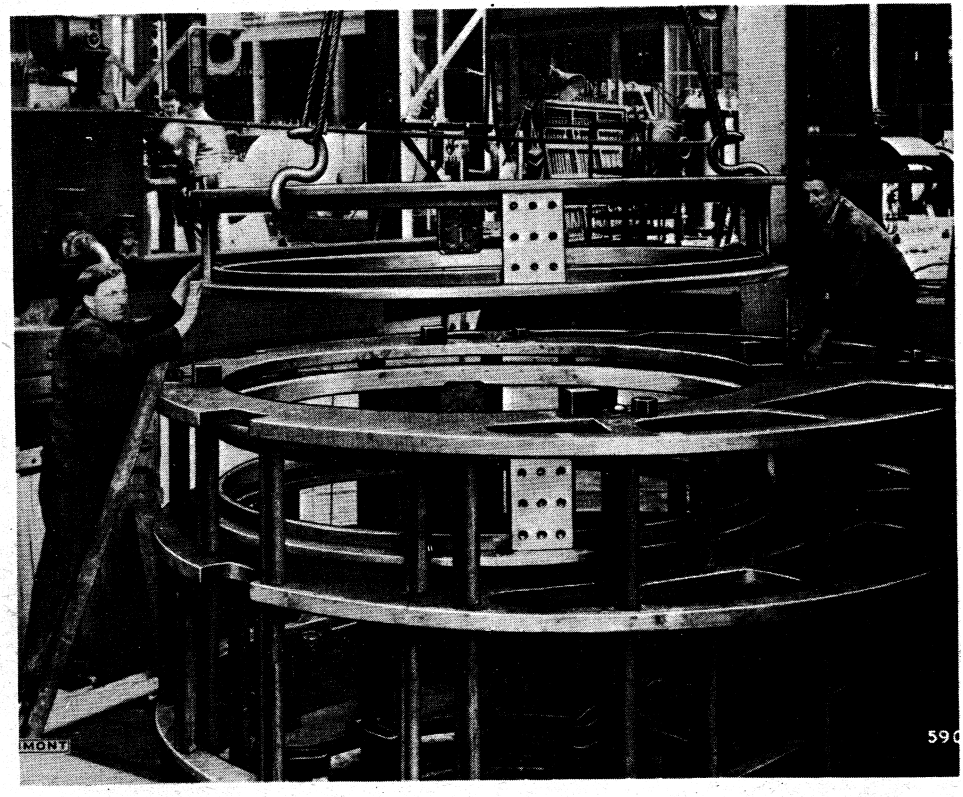
1.223. Machines de grande puissance.

Pour des puissances très élevées, on a recours exclusivement à la construction par éléments en tôle soudée qui permet d'obtenir des ensembles légers.

faciles à usiner en partant d'un produit métallurgique dont les caractéristiques mécaniques sont connues avec précision. Une telle carcasse comprend des disques circulaires en tôle d'acier, distancés par des entretoises tubulaires ou profilées. Une virole extérieure recouvre le tout et constitue une enveloppe de protection. Sur la périphérie intérieure, des barreaux disposés dans le sens axial, constituent des nervures sur lesquelles s'appuie le circuit magnétique (*fig.* 7 et 8). Ces barreaux peuvent se prolonger par des tiges filetées qui servent à fixer des plateaux entre lesquels sera serré le circuit magnétique.

Pour des machines de très grand diamètre (plusieurs mètres) chaque disque est formé lui-même de plusieurs secteurs assemblés par soudure.

Il est possible par ce procédé de réaliser des machines en plusieurs parties. Cette technique est quelquefois indispensable pour que le transport des très grandes machines reste possible.



(Cliché Jeumont.)

Fig. 8. — Carcasse de turbo-alternateur : mise en place d'un élément.

1.23. — FLASQUES ET PALIERS

Le lecteur aura intérêt à consulter un ouvrage de technologie de construction pour toutes les questions d'ordre général telles que :

— *théorie du graissage par film d'huile* ;

— *jeux de montage des coussinets et roulements* ;

— *choix des différents types de roulements et butées d'après les charges radiales et axiales admissibles.*

Du point de vue des efforts appliqués sur les paliers, il existe, sur les machines électriques, un phénomène très particulier. Le rotor est en effet soumis à des attractions magnétiques qui se combinent avec les effets dus à la pesanteur. On comprend dès lors l'importance d'un entrefer régulier ; en cas de décentrage, les attractions magnétiques peuvent provoquer une usure accélérée des coussinets. De plus, un décentrage est toujours générateur de troubles de fonctionnement, tels que déséquilibres des courants dans les différents circuits en parallèle et bruits caractéristiques. De même, dans le sens axial, le rotor a tendance à se placer de telle sorte qu'il soit parcouru par le flux maximal. A partir d'une certaine puissance, il est nécessaire de monter les paliers avec suffisamment de soin pour qu'ils maintiennent le rotor dans sa position d'équilibre magnétique, sinon des poussées axiales se manifestent et peuvent, là aussi, provoquer une usure prématurée.

1.231. Machines de très faible puissance.

On emploie soit le coussinet lisse, généralement du type fritté autolubrifiant, soit le roulement à billes. Dans tous les cas, ces organes sont supportés par les flasques latéraux exécutés soit en tôle emboutie, soit en alliage léger coulé en coquille. Les coussinets peuvent être à rotule, ce qui dispense d'un usinage très soigné sur les flasques ; le coussinet s'oriente alors facilement dans l'axe du rotor.

1.232. Machines de puissance moyenne.

On emploie sur les machines modernes, à peu près exclusivement les roulements à cause de la facilité de moulage et d'usinage des flasques, de la facilité de montage et de l'absence presque complète d'entretien. Suivant les conditions de charge de la machine, on utilise :

— des *roulements à simple ou double rangée de billes* ;

— des *roulements oscillants à billes* ;

— des *roulements à galets cylindriques* ;

— plus rarement des *roulements à aiguilles*, des *roulements à galets coniques* type Timken ;

— éventuellement, dans le cas de poussées axiales importantes, des *butées à billes.*

Les *paliers à coussinets lisses* sont quelquefois adoptés lorsqu'on recherche un fonctionnement silencieux.

Dans tous les cas, roulements et coussinets sont supportés par les *flasques*, le plus souvent en fonte. Les *figures* 9 indiquent quelques types de montage de roulements.

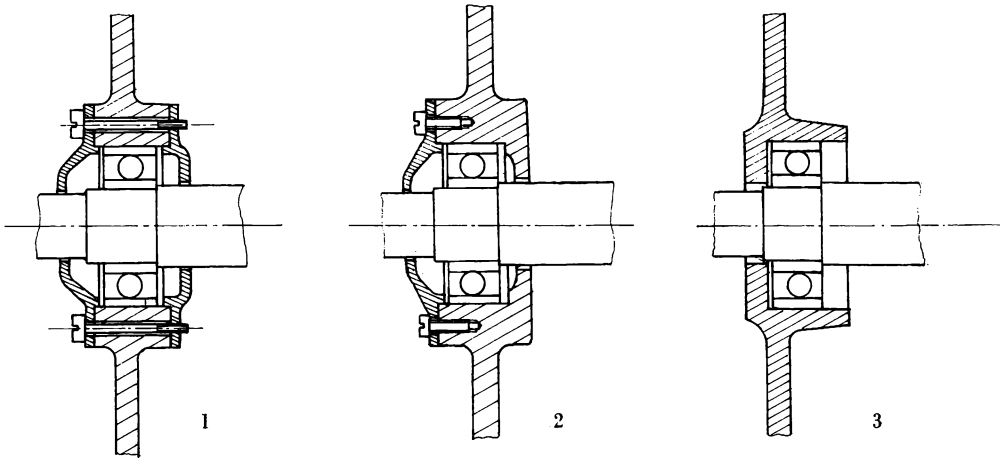


Fig. 9. — Montage des roulements :

1. Avec couvercles intérieur et extérieur.
2. Avec couvercle extérieur.
3. Sans couvercle.

1.233. Machines de très grande puissance.

La conception et la disposition des paliers sont très différentes selon qu'il s'agit de machines à axe vertical ou à axe horizontal.

Les forces s'exerçant sur les paliers sont considérables et obligent de prévoir de très grandes surfaces de contact.

On a recours exclusivement à des *coussinets lisses*. Les machines à grande vitesse (turbo-alternateurs, compensateurs) sont généralement refroidies par un courant interne d'hydrogène et l'étanchéité aux sorties d'arbre, par rapport à l'extérieur, doit être assurée pour toutes les pressions de fonctionnement. On l'obtient par un joint d'huile sous pression entre l'arbre et des bagues spéciales entourant l'arbre.

Les paliers peuvent être supportés par des flasques prenant appui sur la

carcasse, comme sur les machines de puissance moyenne ; ce sera notamment le cas pour les *turbo-alternateurs* à refroidissement dans l'hydrogène.

Les *machines à refroidissement par l'air ambiant*, à *axe horizontal*, peuvent être munies de paliers séparés suivant le schéma indiqué par la *figure* 10. Carcasse et paliers reposent sur une même plaque de base.

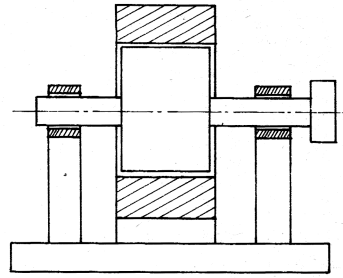


Fig. 10.

Les *alternateurs de grande puissance à axe vertical* sont accouplés à des turbines hydrauliques et les paliers doivent assurer le guidage en rotation et supporter, outre le poids des parties tournantes, la poussée de l'eau. Par ailleurs, au moment du démarrage, si le rotor est resté longtemps à l'arrêt, il peut être nécessaire de le soulever légèrement afin qu'il s'établisse un film d'huile. Toutes ces conditions confèrent au palier certaines particularités. La *figure* 11 montre l'organisation générale d'un pivotage d'alternateur vertical.

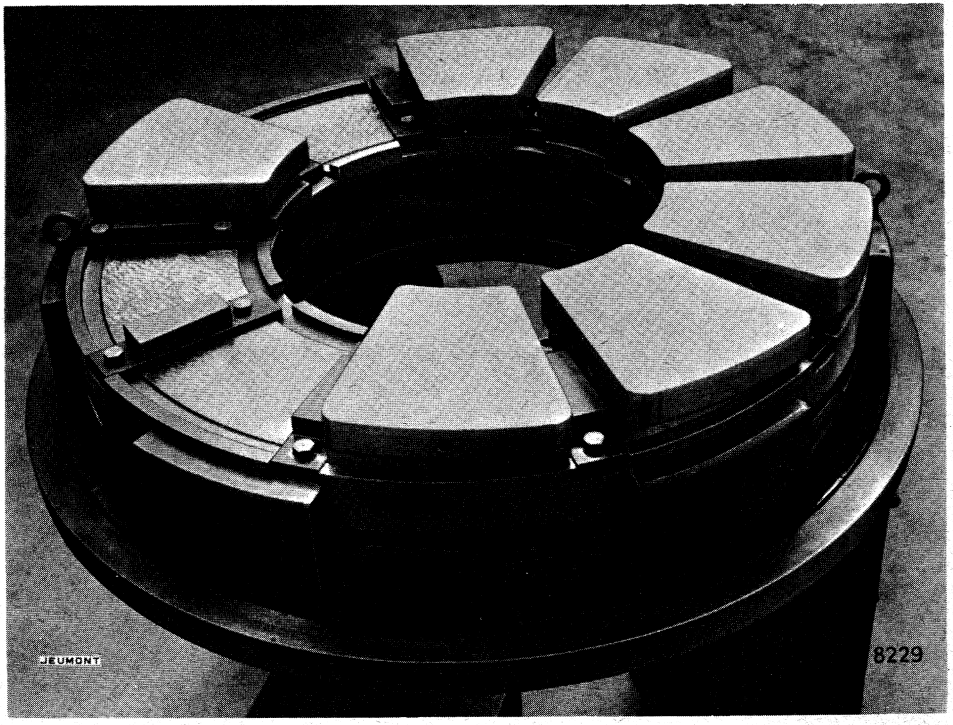


Fig. 11. *(Cliché Jeumont.)*

La photo montre les patins fixes sur lesquels s'appuie la glace tournante solidaire du rotor.

Le pivot peut être placé soit à la partie inférieure du rotor (au-dessus ou au-dessous de l'accouplement avec la turbine), soit à la partie supérieure de la turbine. Les *figures* 12 indiquent quelques cas typiques de montage. La glace repose sur des patins oscillants afin d'obtenir une répartition de la charge aussi uniforme que possible. Le dégagement de chaleur oblige à prévoir un refroidissement efficace. On l'obtient en ventilant les boîtes à huile munies extérieurement d'ailettes, ou encore en faisant passer un serpentin d'eau à l'intérieur des boîtes à huile. Le levage du rotor est assuré par des vérins hydrauliques ou pneumatiques agissant sur une piste circulaire solidaire du rotor et disposée à sa partie inférieure.

Le fonctionnement prolongé des pivots à une vitesse inférieure à la valeur nominale peut être préjudiciable à leur tenue. Aussi on a intérêt à procéder le plus vite possible à l'arrêt après la fermeture des vannes alimentant la turbine. A cet effet, on freine le rotor soit en utilisant les vérins déjà effectués au levage, soit avec d'autres vérins agissant radialement (*fig.* 13).

Fig. 13. *(Cliché C.E.M.)*

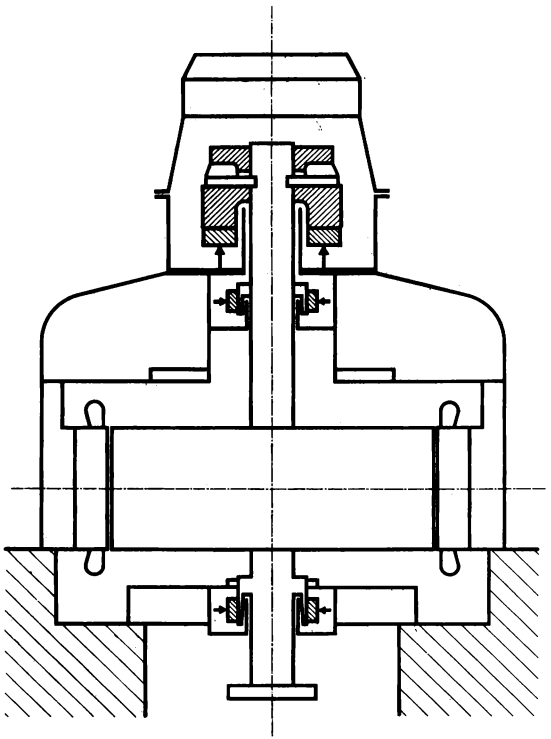


Fig. 12 *a.* — Disposition classique.
Le pivot repose sur le croisillon supérieur.

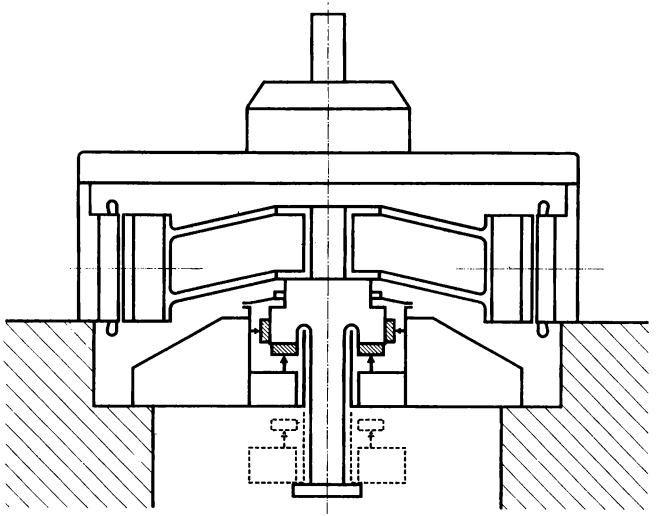


Fig. 12 *b.* — Disposition en « parapluie ».
Le pivot, combiné avec le coussinet de centrage unique, repose sur un palier situé en dessous du rotor.

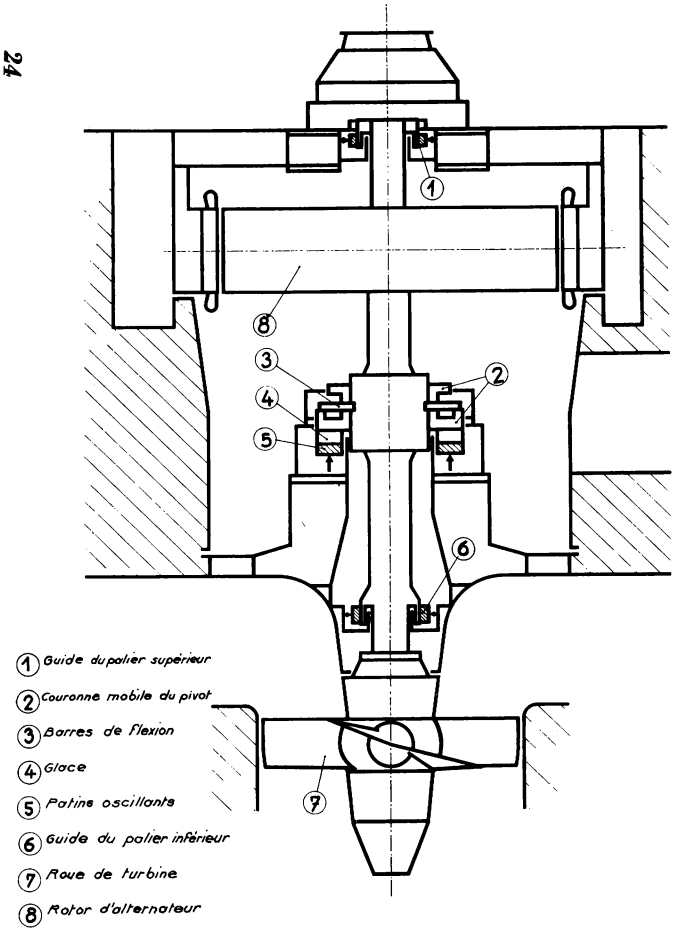


Fig. 12 *c.* — Disposition en faux-parapluie.
Le pivot repose sur le couvercle de la turbine.

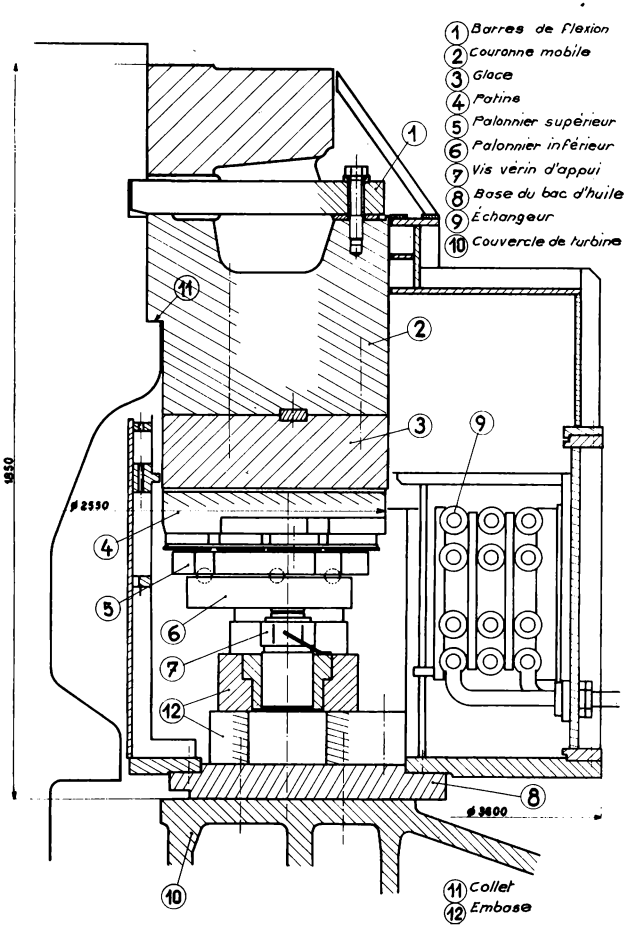


Fig. 12*d.* — Détail d'un pivot monté en faux-parapluie.
(Documents Jeumont-Schneider.)

Les flasques prennent généralement la forme de croisillons composés d'un moyeu supportant les coussinets et des bras qui reposent sur la carcasse.

1.234. Courants de paliers.

Dans les machines de grande puissance, des flux parasites peuvent produire des *courants induits* se refermant par les paliers, l'arbre et la carcasse de la machine. Le passage entre paliers et arbre ne peut se faire que par perforation du film d'huile ; il en résulte des piqûres sur la surface de l'arbre.

On remédie à cet inconvénient par l'un ou plusieurs des moyens suivants :

— *étude des connexions* de façon à éviter le plus possible ces flux parasites. Cette méthode est possible notamment dans les connexions qui, sur les dynamos à très forte intensité, relient les différents pôles auxiliaires et les enroulements de compensation.

— *montage d'un balai sur l'arbre* de façon à court-circuiter le film d'huile ; ce procédé n'est pas toujours efficace car la chute de tension du balai est du même ordre de grandeur que celle qui provoque le claquage du film d'huile.

— *isolation électrique de l'un des paliers* par rapport aux autres masses métalliques. On peut interposer une cale en matière isolante (bakélite, par exemple) en un endroit quelconque pour provoquer une coupure dans les circuits des courants induits. Il faut toutefois prendre soin de ne pas détruire cette isolation par des tuyauteries d'huile ou des canalisations métalliques quelconques.

1.24. — VENTILATEURS

Nous indiquerons simplement les différents types du point de vue du principe de fonctionnement :

◆ **Ventilateur hélicoïdal :** les pales sont inclinées de telle sorte que le choc des filets d'air soit réduit au minimum. C'est ce type de ventilateur qui présente le meilleur rendement, mais il ne fonctionne que pour un sens de rotation. On le trouve sur les grandes machines ayant un sens de rotation bien défini (alternateurs, moteurs de compresseurs) (*fig.* 14 *a*).

◆ **Ventilateur centrifuge :** les formes sont variées. Si on recherche une ventilation efficace, la turbine représente une solution intéressante, mais les pales incurvées par rapport aux rayons n'autorisent qu'un sens de rotation (*fig.* 14 *b*).

Le ventilateur à pales radiales présente le seul avantage de pouvoir fonctionner dans les deux sens de rotation (*fig.* 14 *c*). Afin de réduire les bruits dus aux fréquences pures, certains constructeurs utilisent des pales réparties irrégulièrement.

Les ventilateurs peuvent être complétés par des déflecteurs fixes dont le but est de diriger au mieux les filets d'air sur les parties à refroidir. La ventilation présente une importance considérable pour les grosses machines et elle doit faire l'objet d'une étude d'autant plus poussée que la machine est plus puissante.

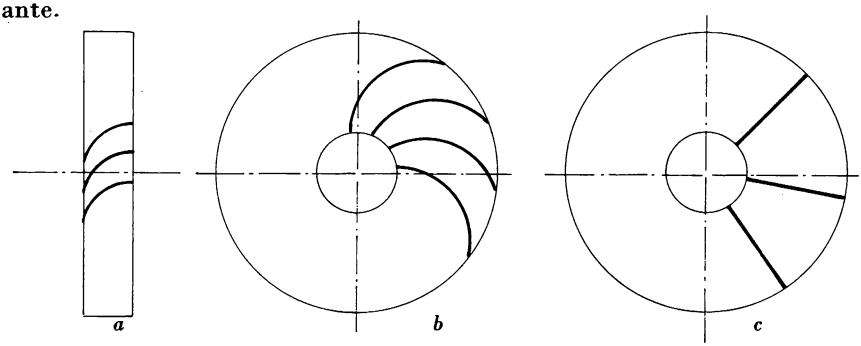


Fig. 14.

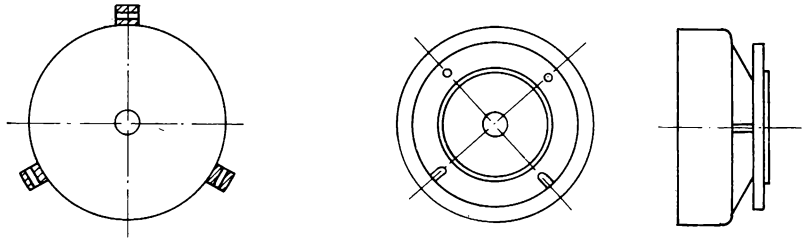
1.25. — FIXATION DES MACHINES

1.251. Moteurs à incorporer.

Le développement très intense des petits appareils portatifs à usages domestique ou industriel a provoqué la généralisation du moteur dit « à incorporer ». Aucun système de fixation n'est spécialement prévu. Le moteur s'intègre à l'intérieur de l'appareil où il est maintenu assez souvent par l'intermédiaire de joints en caoutchouc, de ressorts, de butées élastiques. Dans d'autres cas, c'est toute la machine qui vient se construire à partir du moteur et celui-ci reste alors apparent (1).

1.252. Fixation par flasque bride.

Un des flasques comporte un *embrèvement de centrage* perpendiculaire à l'axe du moteur. La fixation s'effectue par vis, goujons ou boulons (*fig.* 15). Cette



Flasque à bossages. *Fig.* 15. *Flasque bride.*

(1) Nous demandons au lecteur d'examiner quelques spécimens de ces appareils (moulins à café, batteurs, sèche-cheveux, outillage artisanal portatif).

disposition est réservée aux machines de faible puissance et le montage peut alors se faire dans n'importe quelle orientation. Des machines verticales de puissance élevée peuvent également être montées sur flasques brides (pompes par exemple).

1.253. Fixation par pattes.

Dans la plupart des cas, la fixation des machines s'effectue par *pattes*. Elles viennent de fonderie avec la carcasse si celle-ci est en fonte ou en alliage léger. Les carcasses en tôle soudée sont munies de pattes rapportées par soudage.

Dans quelques rares cas, sur des petites machines, les *pattes font corps avec les flasques*, mais cette disposition oblige à un dégauchissage rigoureux afin que les deux pattes soient dans le même plan (*fig.* 16).

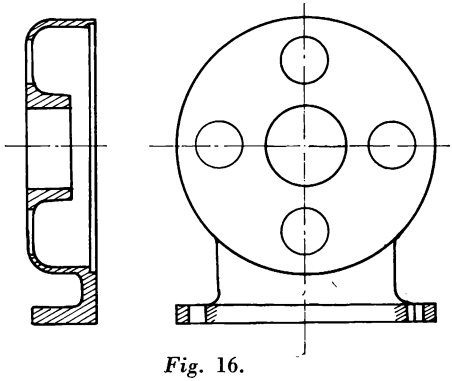


Fig. 16.

Sur les grosses machines, le plan de fixation peut être situé *au-dessus de la génératrice la plus basse*, alors que sur les machines de faible puissance, le plan de fixation constitue toujours le *plan inférieur de la machine* (*fig.* 16 *bis*).

Il existe enfin des systèmes spéciaux tels les dispositifs employés en traction électrique ; ils consistent à articuler le moteur sur l'essieu qu'il commande et à le fixer en un autre point par un joint élastique (1).

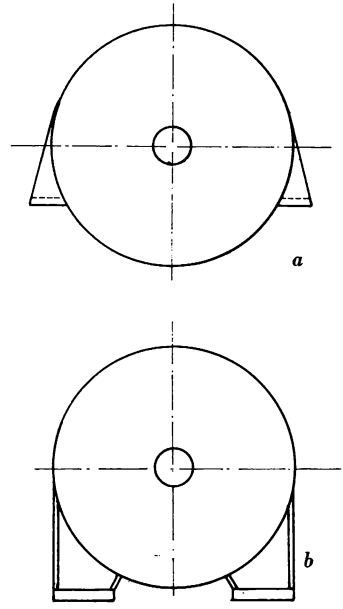


Fig. 16 *bis.*
a. Machine de puissance élevée.
b. Machine de faible puissance.

1.26. — ACCOUPLEMENT

Les organes d'accouplement seront étudiés au chapitre « *Installation et entretien des machines* ».

(1) Voir chapitre « Traction électrique ».

1.3. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES

Contrairement à l'usage établi en électrotechnique qui conduit à étudier les circuits magnétiques sur chaque type de machine, nous classerons les circuits magnétiques en nous appuyant sur l'identité de constitution technologique (circuits fixes et circuits tournants) et en fonction de la nature du flux qui y circule.

1.31. — CIRCUITS FIXES POUR FLUX CONSTANTS

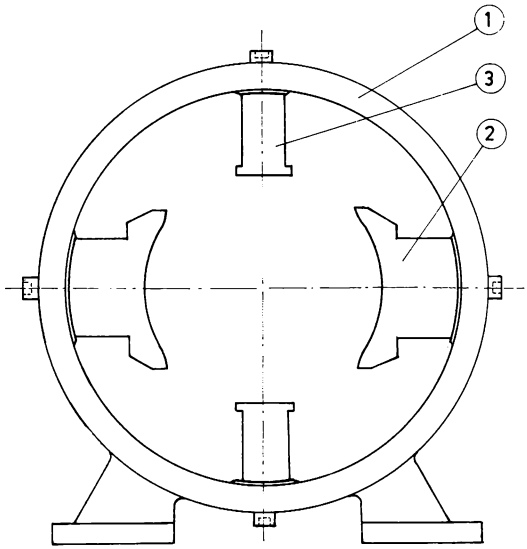


Fig. 17.
Circuit magnétique fixe pour machine à courant continu.
1. Culasse.
2. Pôle principal.
3. Pôle auxiliaire.

Ils se rencontrent dans les machines suivantes :

— *génératrices et moteurs à courant continu ;*

— *alternateurs et moteurs synchrones à induit tournant*, ce cas étant tout de même assez rare et ne se rencontrant que sur les machines de faible puissance ;

— *commutatrices*, que nous citons pour mémoire.

La *figure* 17 indique la constitution générale d'un tel circuit. On remarque que la culasse qui assure la fermeture du flux entre les différents pôles joue également le rôle de carcasse.

1.311. Culasse.

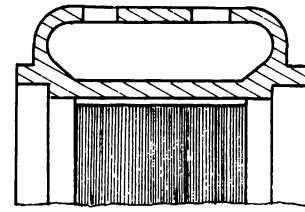
Le métal de la culasse est choisi beaucoup plus pour ses qualités magnétiques que pour ses qualités mécaniques ; c'est ce qui explique l'emploi presque exclusif de l'acier moulé ou de l'acier laminé roulé et soudé.

Les différentes sections de culasse sont indiquées sur la *figure* 18. Les sections nervurées ou en forme de caisson sont nécessaires sur les grandes machines, du fait que l'épaisseur calculée pour le passage du flux est insuffisante du point de vue mécanique pour résister aux contraintes.

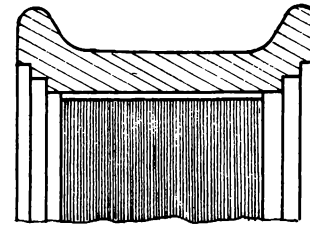
Dans des machines spéciales, où les variations d'excitation très rapides ne doivent pas entraîner une constante de temps trop importante, on a recours à des culasses feuilletées ; on réduit ainsi les courants de Foucault induits dans une culasse massive, pendant le régime transitoire. Cette disposition se rencontre dans les excitatrices de certains alternateurs.

Sur des machines importantes, ou à utilisation spéciale (moteurs de levage), la *culasse peut être en deux parties.* Il est évident que le plan de joint doit se situer en dehors des pôles.

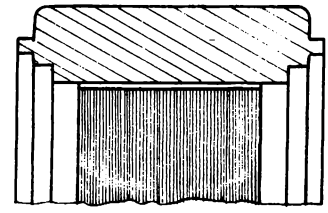
Pour éviter l'usinage complet de l'alésage, les pôles sont montés sur des bossages internes prévus sur toute la largeur de la culasse, mais qui se développent seulement au droit des pôles principaux et auxiliaires. Cet usinage doit être particulièrement soigné puisqu'il constitue un joint magnétique.



a. Caisson.



b. Culasse nervurée.



c. Culasse massive.

Fig. 18.

1.312. Pôles principaux.

Les pôles principaux sont traversés par un flux constant. A première vue, il semblerait donc possible de les réaliser dans un bloc massif coulé. En réalité, il est très difficile d'obtenir des pièces absolument saines, sans soufflures et sans retassures. Il s'ensuit une augmentation de la réluctance et, par conséquent, une augmentation de la force magnéto-motrice nécessaire pour obtenir le même flux. Par ailleurs, en fonctionnement, les épanouissements polaires sont soumis à des fluctuations locales du flux dues à la denture du rotor et il y a donc apparition de pertes. Enfin, si le bobinage induit comporte des circuits en parallèle, les inégalités de flux, dues à des défauts d'homogénéité dans les pôles, peuvent entraîner des courants de circulation.

Pour toutes ces raisons, les *pôles sont feuilletés.* Ils sont constitués par un empilage de tôles en acier doux découpées à la forme du pôle. Leur épaisseur est de l'ordre de 1 à 2 mm et elles ne sont pas isolées entre elles. Elles sont assemblées par rivetage ; pour faciliter l'assemblage on peut prévoir, de chaque côté, une plaque maîtresse plus épaisse.

◆ **Forme des pôles.**

Dans le but d'agir sur les caractéristiques de fonctionnement, on peut, dans le cas des machines à courant continu, donner différentes formes au profil des pôles.

— *Pôle symétrique* : le profil du pôle admet un axe de symétrie, mais en général l'épanouissement situé près de l'entrefer n'est pas concentrique à l'induit. Une excentration sur les bords des becs augmente l'entrefer ; cette disposition permet d'atténuer les effets du flux de réaction d'induit provoqué par le débit de l'induit (réaction transversale) (*fig.* 17).

— *Pôle excentré* : toujours dans le but de diminuer la distorsion due au champ transversal de réaction d'induit, on augmente la réluctance dans les zones où le flux résultant augmente, et on la diminue dans les zones où le flux résultant diminue. Cette disposition amène à prévoir un entrefer plus petit à l'entrée et plus grand à la sortie sur les génératrices, alors que sur un moteur on inverse les excentrations par rapport au sens de rotation. Il en résulte que le sens de rotation doit être défini une fois pour toutes. On arrive également au même résultat en amincissant le bec polaire là ou le flux résultant a tendance à augmenter ; on peut encore couper une partie du bec à une tôle sur deux, par exemple (*fig.* 19).

— *Pôles avec striction* : dans le but d'atténuer les effets de la réaction transversale, on peut encore augmenter la réluctance du pôle, dans le sens transversal, en prévoyant des fentes parallèles à la direction du flux principal et disposées près de l'entrefer (*fig.* 20).

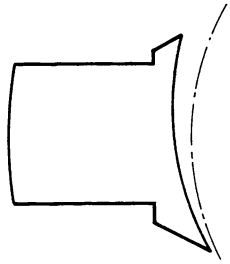


Fig. 19.

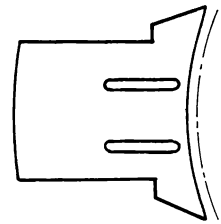


Fig. 20.

On prévoit quelquefois une striction sous les pôles principaux, près de la culasse (*fig.* 21 *et* 22). Cette disposition entraîne une saturation des pôles pour un flux inférieur à celui qui serait nécessaire sans striction ; la caractéristique à vide de la machine utilisée en génératrice est plus ou moins incurvée. Il est alors possible, avec une excitation dérivation, d'obtenir l'amorçage pour une tension relativement faible. Ce montage est quelquefois utilisé pour l'excitation des alternateurs.

— *Pôles avec enroulements de compensation* : les rainures devant recevoir les spires de l'enroulement de compensation sont placées près de l'entrefer ; la dernière spire placée à l'extrémité du bec est retenue par une cale de forme appropriée (*fig.* 23).

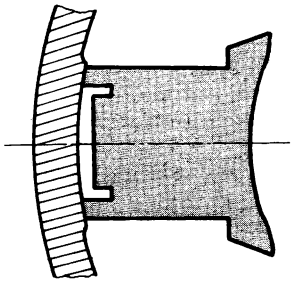


Fig. 21. Schéma du pôle avec striction.

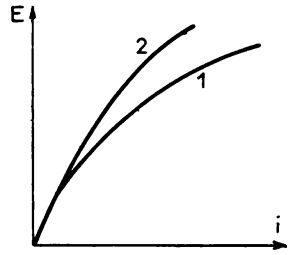


Fig. 22. Caractéristiques à vide comparées d'une génératrice avec striction 1 et sans striction 2.

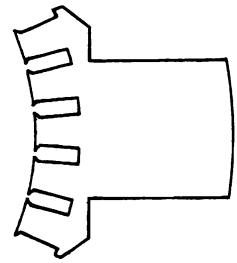


Fig. 23.

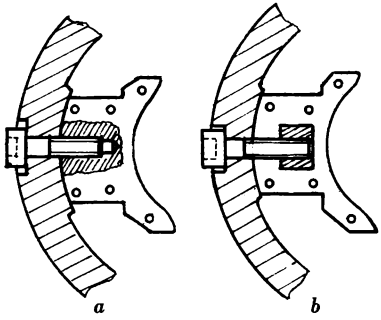


Fig. 24.
a. Taraudage dans les tôles.
b. Clavette rapportée.

◆ **Montage des pôles.**

Il s'effectue par *vis traversant la culasse*. Les trous peuvent être taraudés directement dans les tôles, ou dans une clavette axiale traversant le pôle (*fig.* 24) Dans le but de régler l'entrefer, on peut disposer, entre la culasse et le pôle, une ou plusieurs cales magnétiques (tôles en acier doux).

Pour éviter les flux parasites en dehors de l'induit, la largeur des pôles est généralement inférieure à la longueur du fer du rotor, de l'ordre de 1 cm. Le centrage magnétique de l'induit est assuré au mieux et les oscillations axiales sont évitées, au cas où l'arbre ne serait pas buté.

1.313. Pôles auxiliaires.

Ces pôles ne se rencontrent évidemment que sur les machines à courant continu.

Le pôle auxiliaire ne doit agir que sur les seules sections en commutation ; aussi il est très étroit. L'entrefer est beaucoup plus important que sous les pôles principaux. Les noyaux sont généralement exécutés en acier massif, coulé ou laminé (*fig.* 25) ; on les réalise aussi, mais beaucoup plus rarement, en tôles découpées. La fixation se fait sur la culasse, par vis, comme pour les pôles principaux, et également avec interposition de cales de réglage ; mais, alors

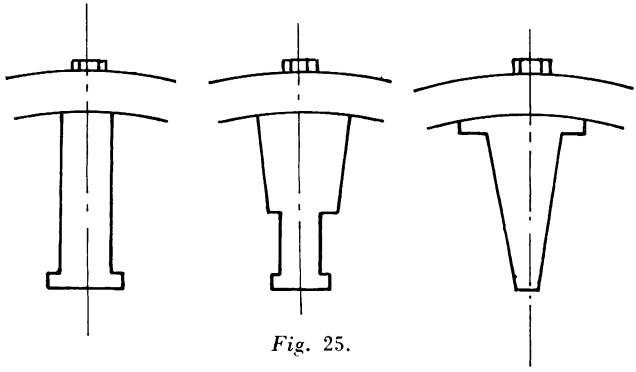


Fig. 25.

que sous les pôles principaux les cales sont toujours magnétiques, on peut être amené, sous les pôles auxiliaires, à prévoir des cales amagnétiques (laiton, zinc), afin de modifier la réluctance du pôle et d'obtenir une bonne commutation.

1.32. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES FIXES POUR FLUX VARIABLES

On les désigne plus généralement sous le nom de *stators* et ils forment les induits d'alternateurs industriels et les inducteurs de machines asynchrones.

Ces circuits sont parcourus par des *flux variables* ; il est donc nécessaire d'éviter au maximum les pertes par courants de Foucault et par hystérésis. On démontre en électrotechnique que ce résultat est atteint en constituant les circuits par des tôles isolées les unes des autres et disposées de telle sorte que le sens de feuilletage soit dans la direction du flux. Les qualités des tôles employées ont été étudiées dans le tome 4 au chapitre « *Matériaux* ».

1.321. Forme des tôles (*fig.* 26).

Les encoches destinées à recevoir les enroulements sont généralement du type semi-fermé. Toutefois, on commence à voir apparaître, dans les moteurs

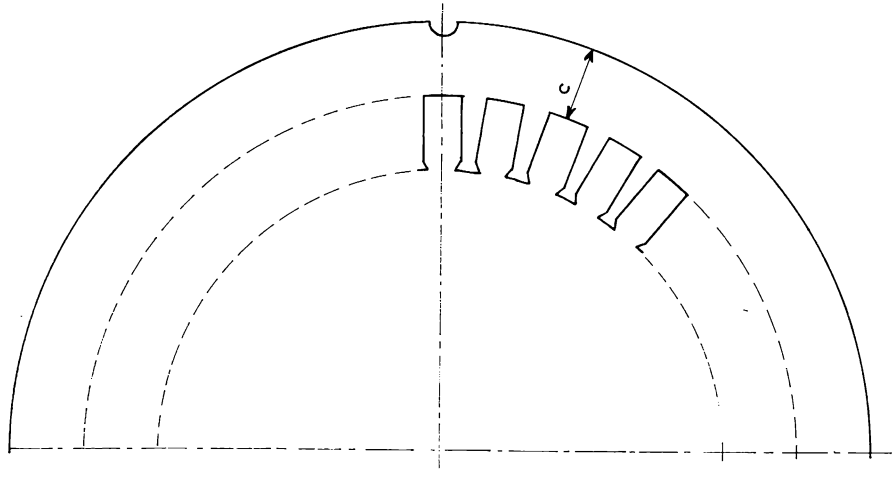


Fig. 26. — *c.* Hauteur de culasse.

de faible puissance, des encoches entièrement ouvertes ; cette disposition permet un bobinage beaucoup plus rapide.

Le flux créé par les inducteurs, ou le flux du champ tournant dans un moteur, se referme par la culasse des tôles ; la hauteur *c* de cette culasse doit être telle que l'induction n'y dépasse pas une valeur raisonnable. Ceci explique que la culasse, à diamètre égal, soit d'autant plus importante que le nombre de pôles est plus réduit.

1.322. Réalisation pratique des tôleries.

◆ **Machines de faible et moyenne puissance.**

Jusqu'à 1 m de diamètre, les tôles sont généralement découpées en une seule pièce. L'empilage est facilité par la présence d'entailles de repérage pratiquées sur la périphérie extérieure.

Après serrage à la presse hydraulique, les tôles sont maintenues entre deux plateaux de serrage, ou entre un plateau de serrage et un épaulement prévu dans la carcasse. Aux extrémités du paquet de tôles, des tôles maîtresses plus épaisses empêchent le foisonnement de la partie dentée.

Le maintien de l'ensemble tôlerie-plateaux est assuré, dans la carcasse, par des clavettes transversales introduites dans des rainures pratiquées dans les nervures de la carcasse (*fig.* 6). Pour les petites machines, on peut supprimer les plateaux de serrage et faire reposer les clavettes directement sur les tôles maîtresses.

Dans les *machines sans carcasses*, les tôles sont assemblées entre elles par *quelques rivets*.

Enfin, nous avons signalé par ailleurs le procédé qui consiste à *couler directement la carcasse* sur le paquet de tôles (*fig.* 5).

A partir d'une certaine longueur de fer, le refroidissement des tôles est délicat par suite de l'interposition des isolants entre tôles. On le facilite en fractionnant le paquet de tôles de façon à former des évents circulaires par lesquels passe l'air de ventilation.

Les paquets élémentaires de tôles, d'une épaisseur de l'ordre de 100 mm au plus, sont séparés entre eux par des distanceurs placés entre deux encoches (*fig.* 27). Les distanceurs sont de section rectangulaire ou en forme de I et assemblés aux tôles maîtresses par un rivetage ou un point de soudure. Ils sont de section rectangulaire et généralement pliés, afin d'offrir une plus grande résistance aux efforts de compression appliqués sur les tôles.

◆ **Machines de puissance élevée.**

Lorsque le diamètre des stators dépasse 1 m, il n'est plus possible de découper les tôles en une seule pièce. Il faut alors prévoir des *segments* qui sont empilés en croisant les joints.

L'assemblage à l'intérieur de la carcasse se fait sur des clavettes de guidage, vissées ou soudées sur les nervures, de forme circulaire, rectangulaire, ou en queue d'aronde. Le serrage dans le sens axial peut être effectué :

— par des *clavettes transversales* prises dans les rainures des nervures (*fig.* 28) ;

— par des *boulons entre des plateaux circulaires* ou des *segments* prenant appui sur la carcasse. Le serrage par segments permet une meilleure répartition de l'effort sur les tôles (*fig.* 29).

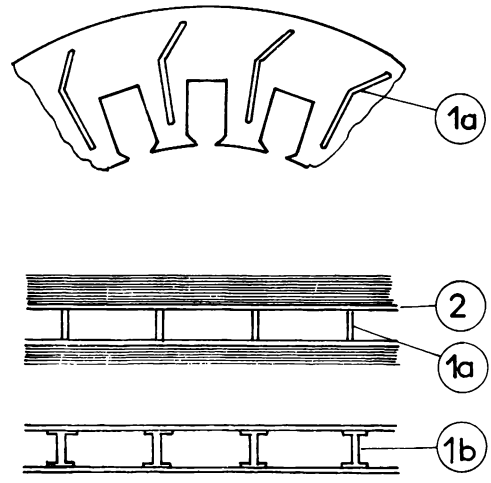


Fig. 27.

1*a*. Distanceur à section rectangulaire.
1*b*. Distanceur à section en I.
2. Tôle maîtresse.

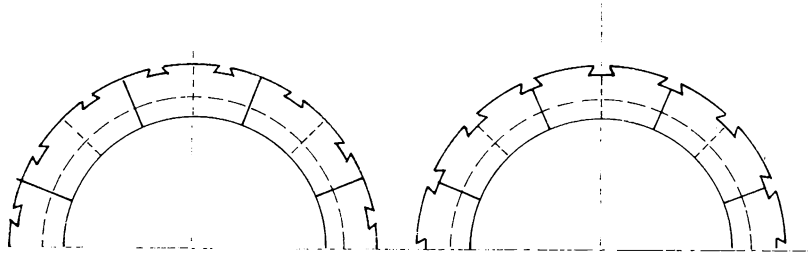


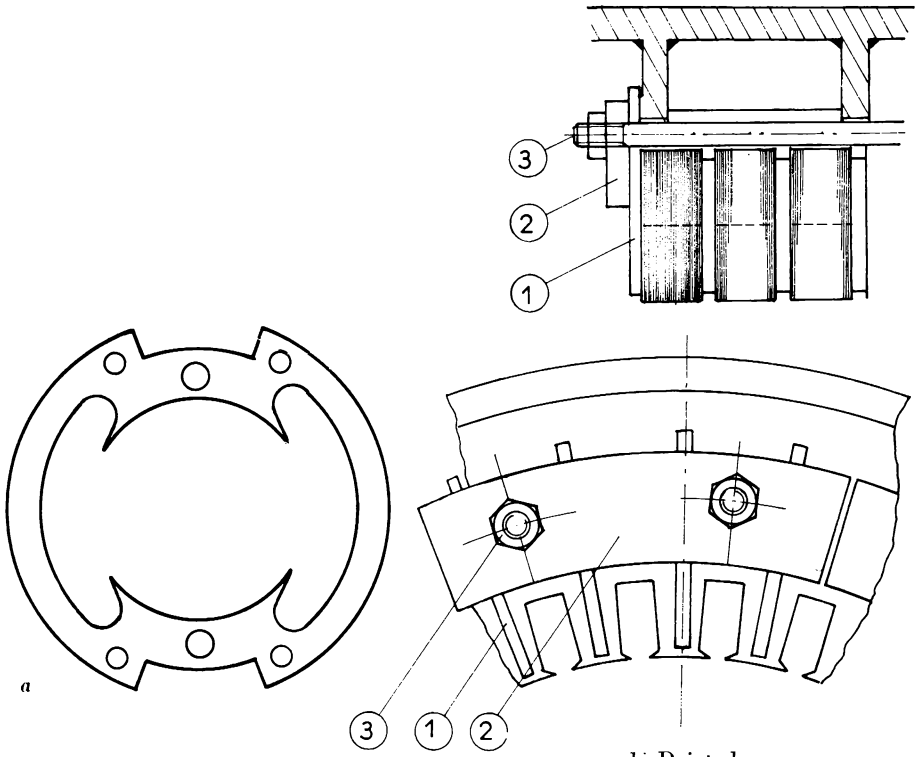
Fig. 28.

Afin d'éviter le foisonnement de la partie encochée des tôles, des doigts pris sous les plateaux ou les segments assurent le serrage sur les dents elles-mêmes.

On peut également prolonger les nervures de la carcasse par des tiges filetées et s'en servir pour le serrage des plateaux. Cette disposition est notamment utilisée pour les turbo-alternateurs.

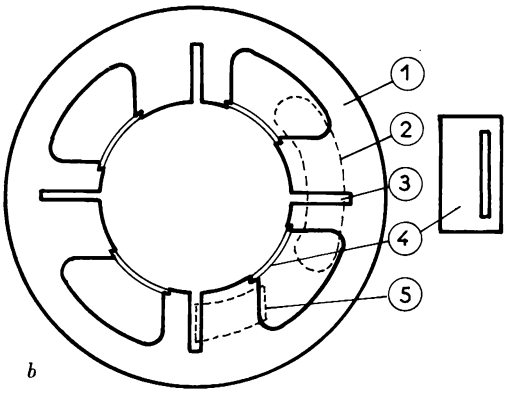
◆ **Inducteurs pour moteurs universels et moteurs à spires de déphasage.**

La forme donnée aux tôles permet de loger les bobines inductrices après isolation et mise en forme (*fig.* 30).



1. Doigt de serrage.
2. Segment.
3. Boulon de serrage.

Fig. 29.



1. Tôle.
2. Bobine principale.
3. Entaille.
4. Cale magnétique.
5. Spire en court-circuit.

Fig. 30. — Inducteurs pour moteurs monophasés.
a. Universel à collecteur.
b. A induction à spire de Frager.

Etant donné les faibles puissances mises en jeu, les techniques d'assemblage sont extrêmement simples. Les tôles sont maintenues entre elles par des petits rivets et simplement emmanchées à l'intérieur de la carcasse quand elle existe, ou, au plus, arrêtées par une vis pointeau.

1.33. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES TOURNANTS POUR FLUX CONSTANTS

On les rencontre :

— dans les *inducteurs d'alternateurs industriels* ;

— dans les *inducteurs de moteurs synchrones* et de *compensateurs synchrones*.

Les procédés de réalisation dépendent essentiellement des vitesses de rotation atteintes, soit en fonctionnement normal, soit en cas d'emballement.

1.331. Turbo-alternateurs.

L'arbre et le circuit magnétique ne forment qu'une seule pièce. Actuellement, en France, Electricité de France qui est, de très loin, le principal acheteur de turbo-alternateurs, exige un arbre monobloc en acier forgé. Toutefois, il existe encore en service des machines dans lesquelles l'arbre est en plusieurs parties.

◆ **Arbre en une seule pièce.**

Tous les épaulements sont prévus à *l'ébauche de forge*. Le diamètre est imposé par des raisons de tenue à la force centrifuge ; c'est ainsi que sur les turbo-alternateurs de 250 MW, le diamètre est de 1 150 mm environ, alors que sur les turbo-alternateurs précédents de 125 MW, tournant à la même vitesse, soit 3 000 tr/mn, le diamètre était déjà de 1 100 mm environ. De telles valeurs impliquent l'emploi d'aciers spéciaux au nickel chrome molybdène, vanadium, choisis beaucoup plus en raison de leurs caractéristiques mécaniques que de leurs propriétés magnétiques. Pour des puissances plus modestes, on peut employer des aciers au nickel chrome, ou même des aciers au carbone.

L'enroulement est logé dans des encoches radiales fraisées dans la masse. Des encoches vides sont destinées à faciliter le refroidissement, en créant un chemin de circulation pour le fluide réfrigérant.

Du fait de la présence des dents sur la tôlerie du stator, il apparaît, à la surface extérieure du rotor, des fluctuations du champ magnétique, génératrices de pertes. On les évite en pratiquant des saignées circulaires de 1 mm de largeur et dont la profondeur n'excède pas 1 à 2 mm. Elles sont espacées d'environ 5mm et forment ainsi une sorte de feuilletage de la surface externe.

On peut remarquer également que la présence des encoches a pour effet

de rendre inégale la rigidité du rotor suivant les deux axes principaux de symétrie et de provoquer certaines vibrations. On peut éviter cet inconvénient en pratiquant à intervalles réguliers, des saignées sur les parties non encochées (*fig.* 31).

◆ **Rotors en plusieurs pièces.**

On comprend les inquiétudes des métallurgistes devant forger des pièces de grande longueur ; les constructeurs ont été tentés par la solution de l'arbre en plusieurs tronçons.

L'arbre est alors constitué par des disques en acier forgé, encastrés entre eux, et assemblés soit par des boulons, soit par une broche centrale. Les bouts d'arbre sont solidaires du dernier disque, ou rapportés complètement. Les *figures* 32 et 33 indiquent les dispositions les plus fréquentes.

1.332. Alternateurs à pôles saillants.

L'allure générale de ces rotors est indiquée sur la *figure* 34. La forme extérieure de l'épanouissement polaire permet d'obtenir une répartition sinusoïdale du flux dans l'entrefer. La disposition des noyaux varie avec le nombre de pôles et le diamètre du rotor. Nous examinerons successivement la constitution du corps comprenant l'arbre et la couronne, puis les pôles proprement dits.

◆ **Corps du rotor.**

— *Rotor à faible nombre de pôles.*

Lorsque le nombre est au plus égal à 8, le diamètre du rotor reste modéré et les pôles sont fixés directement sur l'arbre, soit par clés rectangulaires, soit par queue d'aronde (*fig.* 35).

— *Rotor à nombre de pôles moyen.*

En augmentant le nombre de pôles, le diamètre augmente ; il n'est plus possible de les fixer directement sur l'arbre. Jusqu'à 16 pôles environ, les variantes de construction présentent une certaine unité. On rencontre généralement, en plus de l'arbre, une couronne sur laquelle les pôles sont fixés.

• Rotor massif : le circuit magnétique est constitué par une pièce massive comprenant la couronne et les noyaux polaires attenants. Les épanouissements polaires sont rapportés et fixés par vis (*fig.* 36).

• Rotor à couronne massive et pôles rapportés : le principe du montage est indiqué sur la *figure* 37. La couronne massive est clavetée sur l'arbre et les pôles sont fixés par vis sur la couronne. Cette disposition oblige à utiliser des vis très longues et on ne l'emploie généralement que pour les diamètres modérés.

• Rotor à couronne en disques : certains alternateurs risquent d'être soumis à des vitesses d'emballement élevées. Pour améliorer leur tenue mécanique, la couronne est constituée par quelques disques épais en acier forgé (jusqu'à 400 mm) (*fig.* 38). Pour les petits diamètres, ces disques sont montés à chaud sur l'arbre.

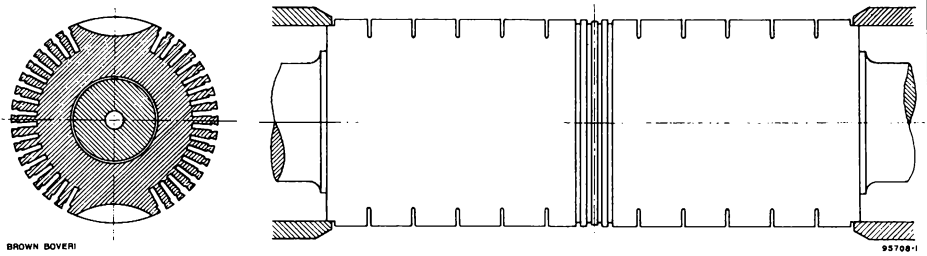


Fig. 31. — Saignées pratiquées dans les zones polaires des grands rotors pour rendre égales les rigidités suivant les deux axes principaux.

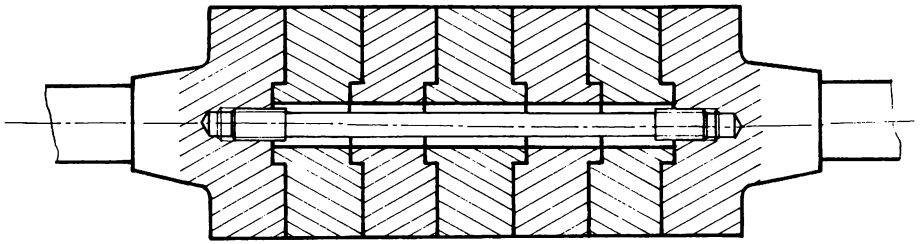


Fig. 32 *a.*
Assemblage des bouts d'arbre par vissage sur une broche centrale.

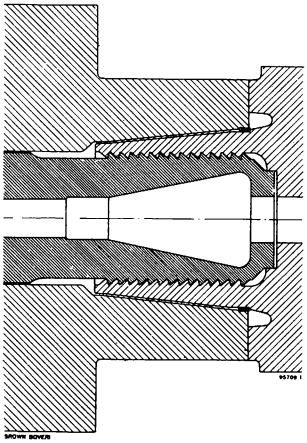


Fig. 32 *b.* — Détail d'assemblage par vissage (système BBC). Construction dite « à écrou plongeur » pour l'assemblage par serrage des grands rotors.

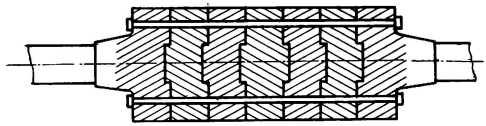


Fig. 33 — Assemblage par boulons.

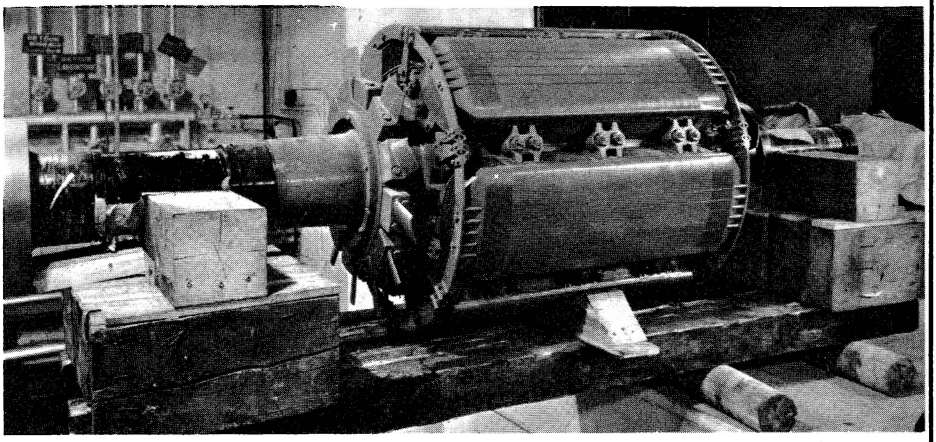


Fig. 34 *b.* *(Doc. Alsthom.)*

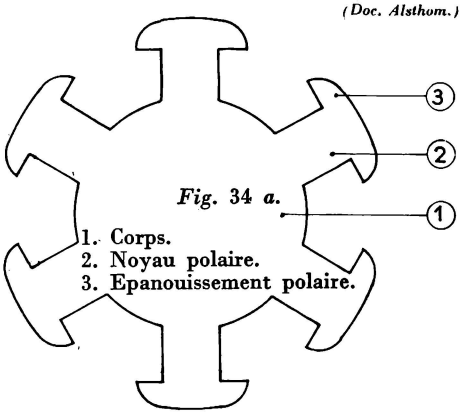


Fig. 34 *a.*

1. Corps.
2. Noyau polaire.
3. Epanouissement polaire.

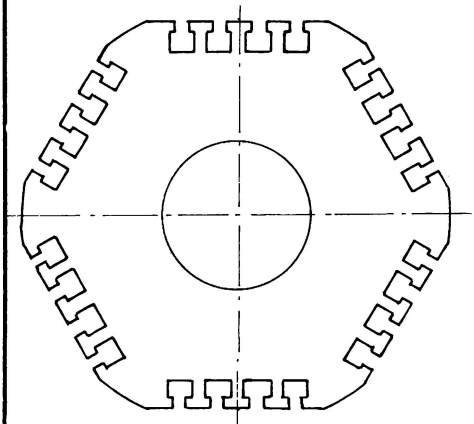


Fig. 35.

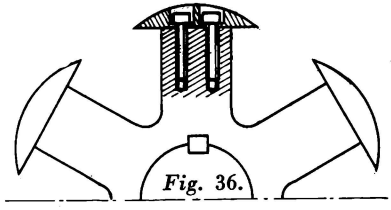


Fig. 36.

Si le diamètre des disques le permet, la partie centrale de l'arbre est supprimée, et seuls les deux bouts munis de plateaux servent à assembler les disques par boulons (*fig.* 39). On diminue ainsi le travail de forge et on élimine, sur l'alésage des disques, les contraintes résultant du serrage provoqué par le montage à chaud.

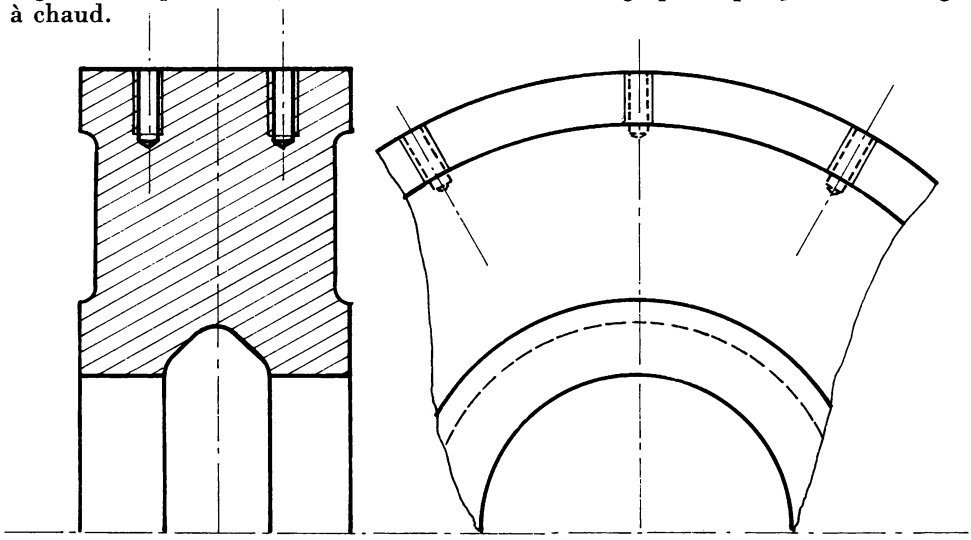


Fig. 37. — Les pôles n'ont pas été représentés.

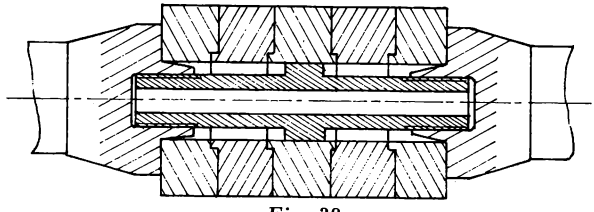


Fig. 38.

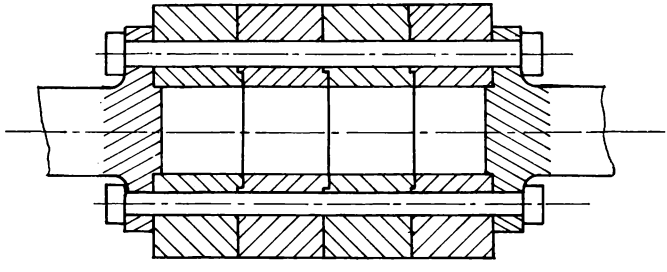


Fig. 39.

Si la longueur du rotor n'est pas trop grande, on peut également constituer le rotor par un simple cylindre creux aux extrémités duquel on rapporte par vis les deux bouts d'arbre (*fig.* 40).

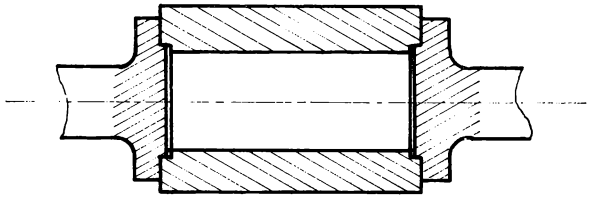


Fig. 40.

• Rotor à couronne en tôle : la couronne est formée par un empilage de tôles épaisses (jusqu'à 40 mm) assemblées par boulons. La fixation des pôles se fait par clés ou queue d'aronde (*fig.* 41).

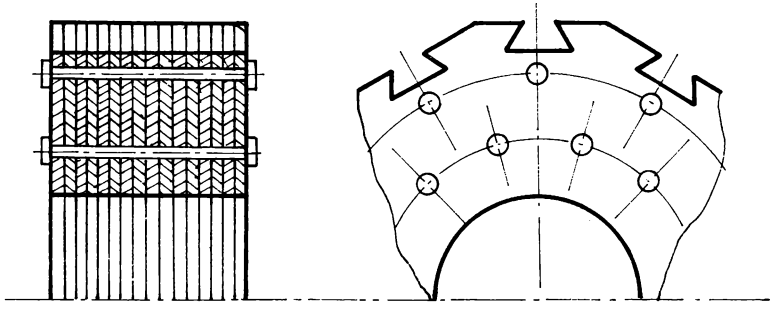


Fig. 41.

— *Rotor à nombre de pôles élevé.*

Lorsque le nombre de pôles croît, par exemple au-delà de 16 pôles, la couronne prend de plus en plus d'importance et il n'est plus possible de la monter directement sur l'arbre. Le rotor prend alors la forme d'un volant dont la couronne porte-pôles constitue la jante, et dont le moyeu reçoit l'arbre. Il faut noter aussi que le diamètre augmentant, les vitesses périphériques peuvent atteindre des valeurs élevées. Cette particularité a son influence sur le mode de construction de l'ensemble.

• Volant massif : ce mode de construction est réservé aux machines à vitesse tangentielle modérée (quelques dizaines de mètres par seconde). Le volant est en acier coulé en une seule pièce ; la jante est réunie au moyeu par

une toile pour les petits diamètres, et par des bras pour les diamètres plus grands. Les pôles soumis à des contraintes mécaniques peu sévères peuvent se fixer par des vis ou des goujons (*fig.* 42).

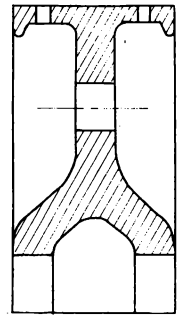


Fig. 42.

• Volant à disques : si, au contraire, le rotor doit supporter des vitesses d'emballement plus élevées, on a recours, pour des diamètres modérés, à des disques en tôle d'acier découpés et assemblés entre eux par des boulons, et montés à chaud sur l'arbre. Des trous formant les canaux de ventilation sont généralement prévus (*fig.* 43).

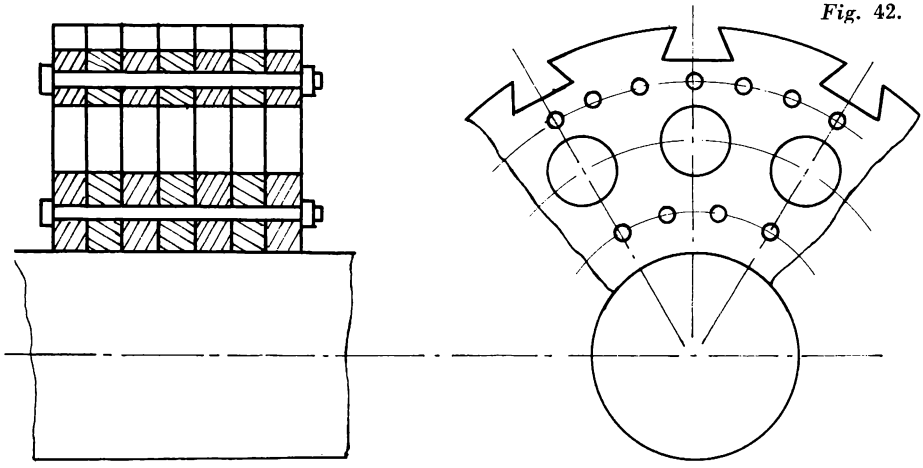


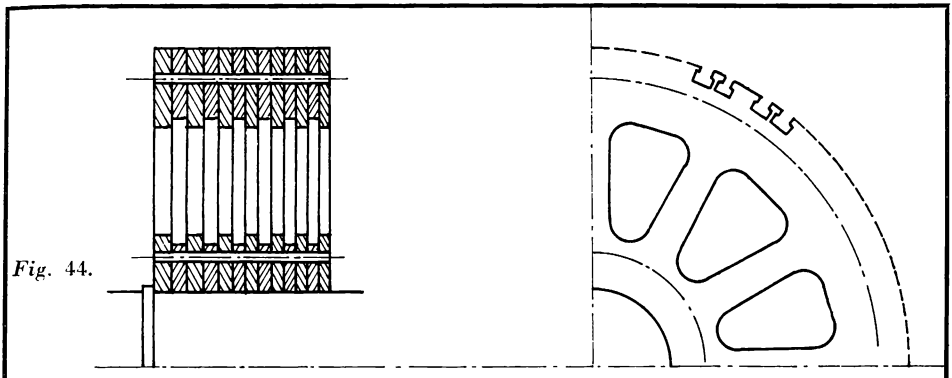
Fig. 43.

Si le diamètre est plus élevé, on allège la construction de l'ensemble en découpant dans des tôles d'acier épaisses des disques ajourés de façon à former un moyeu, une jante et des bras. L'assemblage est encore effectué par des boulons. Il est possible de laisser des évents de ventilation entre plusieurs blocs élémentaires juxtaposés sur l'arbre. Il est possible également de prévoir une tôle sur deux sans bras (*fig.* 44).

• Volants en plusieurs parties : pour les grandes machines à vitesse d'emballement peu élevée (plus de 40 pôles et moins de 40 m/s), il est possible de réaliser le volant en deux ou plusieurs parties. Le moulage et la coulée sont facilités, mais il faut prévoir l'assemblage des différentes parties. Les jantes sont assemblées par boulons et les moyeux par boulons ou frettes posées à chaud (*fig.* 45).

• Volant à jante rapportée (*fig.* 46) : les alternateurs accouplés aux turbines hydrauliques puissantes peuvent présenter des diamètres importants et des

Fig. 44.



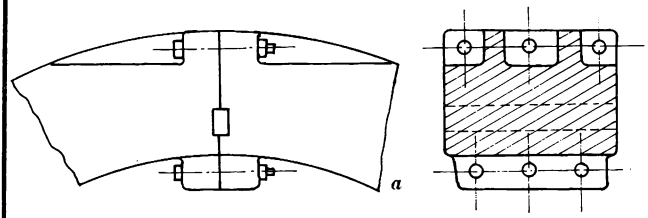
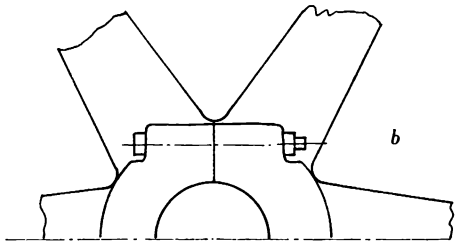


Fig. 45.

a. Assemblage jante.
b. Assemblage du moyeu par boulons.
c. Assemblage du moyeu par frettes.



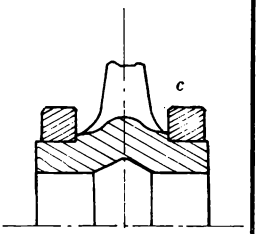
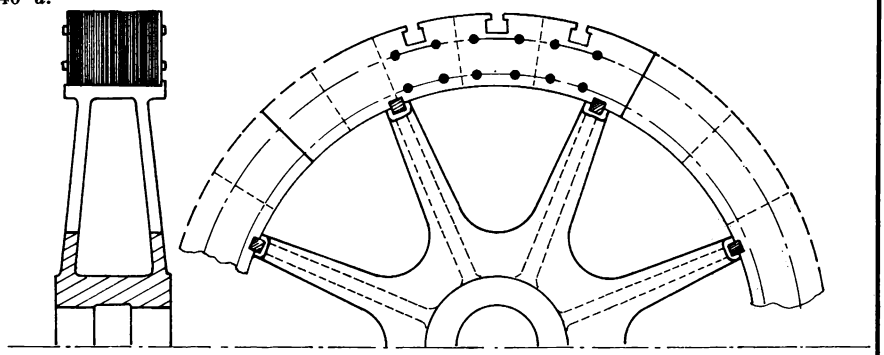
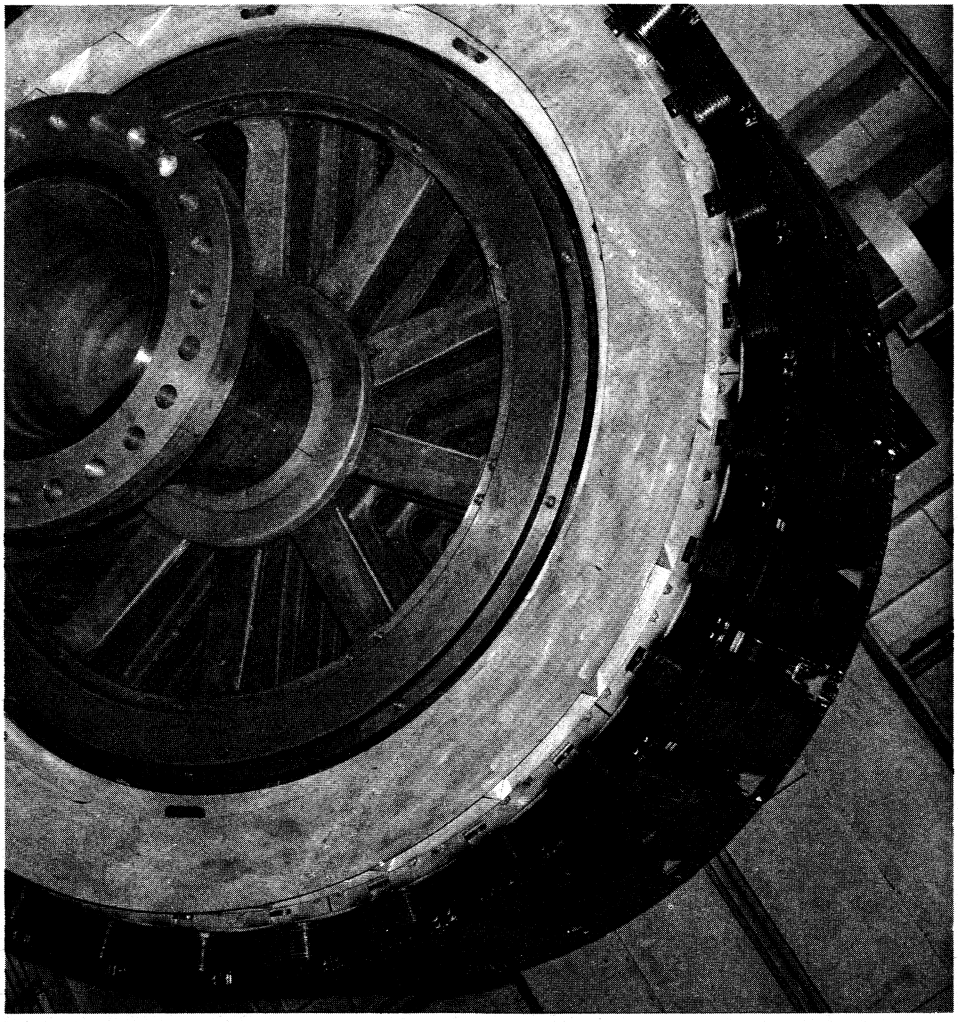


Fig. 46 *a.*



vitesses d'emballement élevées (jusqu'à 150 m/s). On a alors recours à un mode de construction dans lequel le volant est lui-même en deux parties : le moyeu et les bras en acier coulé forment un croisillon sur lequel on rapporte une jante, et c'est, en définitive, sur cette jante que sont fixés les pôles. Dans certaines machines de très grandes dimensions, on peut juxtaposer deux croisillons sur le même arbre.



(Cliché C.E.M.)

Fig. 46 *b.* — Remarquer : le plateau d'accouplement avec la turbine, le croisillon, la piste de freinage, les pôles, l'anneau de la cage placé aux extrémités des pôles.

La jante est formée par un empilage de segments découpés dans de la tôle mince d'acier (quelques millimètres d'épaisseur). L'empilage est réalisé à joints croisés et l'assemblage des tôles est obtenu par des boulons. La fixation sur les bras du croisillon est établie par l'intermédiaire de clavettes montées après chauffage de la jante. La fixation des pôles sur les jantes couronnes s'effectue par clés rectangulaires ou queues d'aronde.

◆ **Pièces polaires.**

En ce qui concerne la technique de fabrication, trois procédés sont utilisés :

— *Noyau venu de fonderie avec le corps du rotor* (voir *fig.* 36, p. 39). Il suffit alors de rapporter l'épanouissement polaire par vis. L'épanouissemcnt peut être rainuré pour éviter l'apparition des courants de Foucault dus à la fluctuation du flux près de l'entrefer. On peut également, au contraire, laisser la surface lisse, et, dans ce cas, les courants de Foucault qui apparaissent dans la masse des épanouissements polaires permettent de supprimer l'enroulement amortisseur.

— *Noyau massif rapporté.* L'ensemble noyau-épanouissement est alors en acier coulé et fixé sur la jante. On peut, comme dans le cas précédent, supprimer l'enroulement amortisseur.

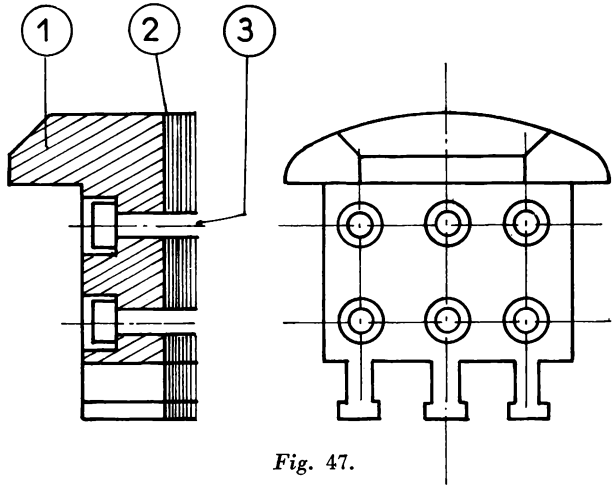


Fig. 47.

1. Bec polaire.
2. Tôles.
3. Boulon d'assemblage.

— *Pôle feuilleté.* Le pôle est formé par l'assemblage de tôles minces d'acier doux découpées au profil du pôle. L'assemblage est réalisé par des boulons de serrage entre des joues massives d'extrémité munies de becs (*fig.* 47).

◆ **Fixation des pôles sur la jante.**

Nous avons déjà signalé que, dans le cas de faibles vitesses d'emballement (inférieures à 40 m/s environ), les contraintes mécaniques exercées sur les pôles sont relativement faibles ; une simple fixation par goujon ou vis est suffisante.

Au contraire, les vitesses d'emballement élevées imposent un système de fixation par clés rectangulaires ou par queues d'aronde. Un montage sans jeu est obtenu par l'intermédiaire de cales en forme de coins doubles (*fig.* 48 *et* 49).

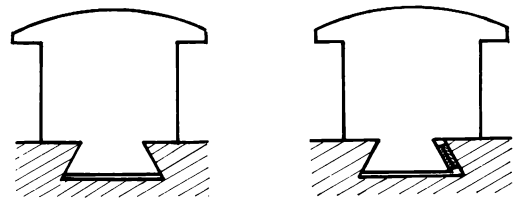


Fig. 48. — Fixation par queue d'aronde.

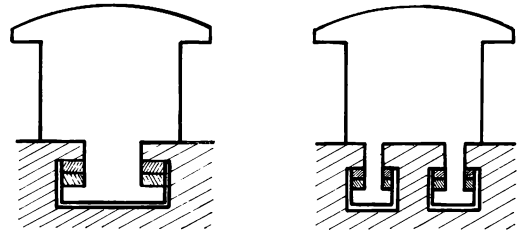


Fig. 49. — Fixation par clés rectangulaires.

1.34. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES TOURNANTS POUR FLUX VARIABLES

On les rencontre à la fois sur les machines à courant continu et sur les machines à courant alternatif :

— *Induits de génératrices et moteurs à courants continus ;*

— *Rotors de machines asynchrones* utilisées en moteurs ou en convertisseurs de fréquence ;

— *Rotors d'alternateurs à induit tournant ;*

— *Rotors de moteurs à collecteur à courant alternatif.*

Remarquons que la fréquence est très variable suivant le type de machine. De quelques hertz pour les rotors de moteurs asynchrones, elle atteint 100 Hz sur une machine à courant continu bipolaire tournant à 6 000 tr/mn et plusieurs centaines sur certains convertisseurs de fréquence.

Pour éviter les pertes résultant des variations de flux, ces circuits sont feuilletés. Les contraintes mécaniques dues aux effets centrifuges, interdisent l'emploi de tôles de haute qualité magnétique, la résistance mécanique des tôles, en raison des teneurs élevées en silicium, variant en sens inverse des qualités magnétiques.

1.341. Forme des encoches.

Les machines à courant continu ayant un entrefer important, de l'ordre de plusieurs millimètres, on peut, sans inconvénient, prévoir des encoches entièrement ouvertes (*fig.* 50).

Les machines d'induction ont un entrefer beaucoup plus réduit, souvent inférieur au millimètre sur les petites machines ; il faut prévoir des encoches qui ne modifient pas trop la réluctance de l'entrefer. On leur donne l'une des formes représentée sur la *figure* 51.

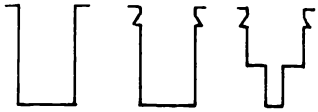


Fig. 50.

a, *b*. Rotors à simple cage.
c, *d*, *e*. Rotors à déplacement de courant.
f, *g*. Rotors à double cage.
h. Rotors à triple cage.
i, *j*. Rotors bobinés.

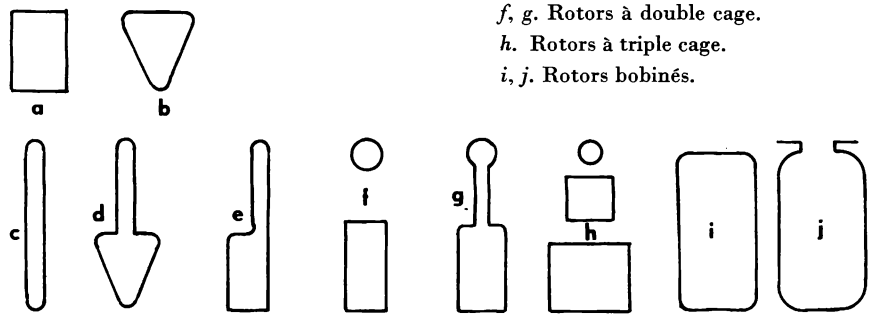


Fig. 51.

1.342. Montage mécanique.

Les mêmes systèmes sont adoptés sur les machines à courant continu et à courant alternatif et ils varient uniquement en fonction du diamètre du rotor.

Les tôles sont découpées en une seule pièce jusqu'à 1 m et en segments pour les diamètres supérieurs.

◆ **Tôles en une seule pièce.**

— *Petits rotors à cage.* Les tôles sont maintenues entre elles par la cage elle-même lorsqu'elle est coulée en aluminium, et elles sont montées sur l'arbre par emmanchement à la presse. Si la cage est en barreaux brasés, cas relativement rare, les tôles peuvent être maintenues entre elles par quelques rivets entre deux flasques légers ou deux tôles maîtresses.

— *Rotors bobinés.* Si le diamètre est suffisamment petit, (cas de machines de faible puissance comportant au plus 4 ou 6 pôles), les tôles sont encore montées directement sur l'arbre et serrées entre deux plateaux. Un des plateaux s'appuie sur un collet de l'arbre, tandis que l'autre est bloqué par un écrou (*fig.* 52). Dans certains cas, un plateau cylindrique, dont le diamètre extérieur correspond au fond d'encoche, peut servir de support aux bobinages exécutés en barres. Des trous axiaux permettent le passage de l'air de ventilation.

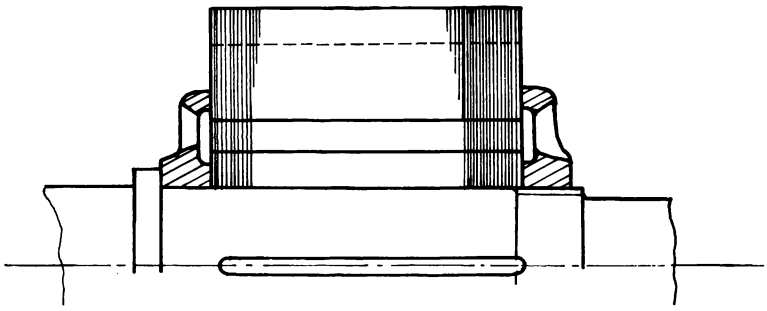
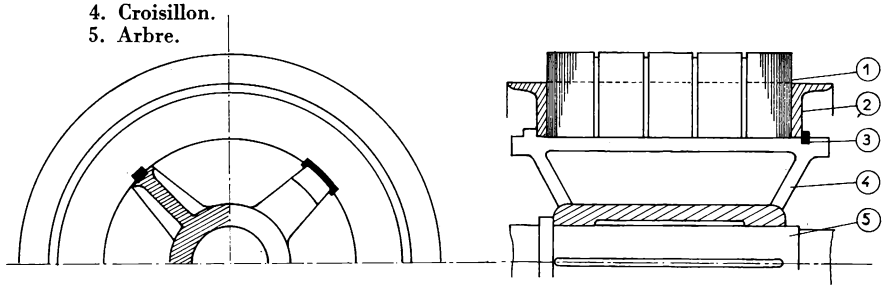


Fig. 52.

Fig. 53. — 1. Tôlerie.
2. Couronne de serrage.
3. Clavette.
4. Croisillon.
5. Arbre.



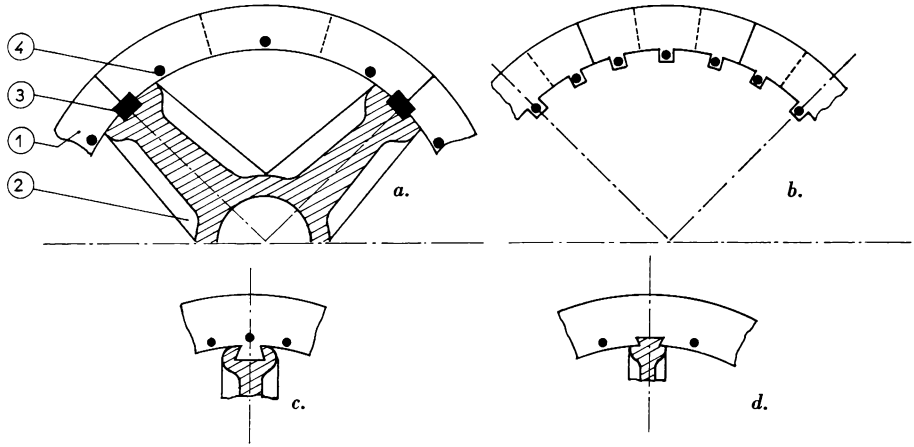
— *Rotors à croisillon.* Lorsque le diamètre augmente, on découpe, par souci d'économie, les tôles en forme de couronne ; elles sont ensuite montées sur un croisillon entre deux flasques de serrage. Un des flasques prend appui sur un épaulement des bras, l'autre est maintenu par des clavettes transversales engagées dans les bras. Si la longueur de fer est importante, on prévoit des évents de ventilation avec des distanceurs placés entre les paquets de tôle. Le blocage du paquet de tôles sur le croisillon est assuré en rotation par une ou plusieurs clavettes longitudinales prises dans les bras du croisillon (*fig.* 53).

◆ **Tôles en segments.**

Lorsque le diamètre dépasse un mètre, il est nécessaire de prévoir des tôles en segments dont la longueur est généralement comprise entre 0,50 et 0,80 m.

L'empilage des tôles se fait à joints croisés ; le serrage est obtenu par des boulons placés en dehors de la zone de passage du flux, soit le plus près possible de la périphérie interne, soit même sur des tenons spécialement prévus à cet effet.

La couronne est encore montée sur un croisillon en fonte, en acier moulé, ou en tôle soudée. Les procédés de construction de ces croisillons sont identiques à ceux employés pour les croisillons des rotors d'alternateurs. L'assemblage sur le croisillon se fait par queue d'aronde ou par les tenons déjà signalés (*fig.* 54).



1. Tôle.
2. Croisillon.
3. Clavette.
4. Boulon.

Fig. 54. — Rotor à croisillon.
a. Fixation des tôles par boulons et clavettes longitudinales.
b. Fixation par boulons sur tenons.
c. d. Fixation par boulons et queue d'aronde.

1.4. — CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Les circuits électriques sont généralement désignés sous le nom d'enroulements ou de bobinages.

Ils sont liés aux circuits magnétiques et, comme ces derniers, peuvent être fixes ou tournants, traversés par des courants continus ou alternatifs

Ils sont soumis à différentes contraintes qui peuvent influer sur leur mode de réalisation.

◆ **Contraintes thermiques.** L'effet Joule, les pertes par courants de Foucault, l'échauffement transmis depuis le fer par conductibilité thermique, entraînent une augmentation de température. Ce phénomène se traduit en définitive par :

— une augmentation de la résistance électrique ;

— une dilatation entraînant à son tour des contraintes mécaniques qui deviennent particulièrement dangereuses sur les machines soumises à des cycles répétés d'échauffement et de refroidissement.

◆ **Contraintes électrodynamiques.** Elles apparaissent sur tous les enroulements fixes ou tournants. Complètement négligeables dans les machines à faibles intensités, elles deviennent importantes sur les machines très puissantes, notamment en cas de court circuit. Elles sont surtout à redouter dans les zones où les conducteurs ne sont plus maintenus rigidement, comme par exemple dans les têtes de bobines situées à l'extérieur des encoches.

◆ **Contraintes mécaniques.** En plus des efforts mécaniques résultant de l'échauffement, les enroulements tournants sont soumis à l'action de la force centrifuge. Il apparaît des efforts considérables sur les machines puissantes, ce qui oblige à prévoir des système de frettage. *(Voir 3e partie : Réalisation pratique des enroulements.)*

◆ **Contraintes diélectriques.** Elles s'exercent sur les isolants séparant les conducteurs entre eux et par rapport au fer. C'est par un choix approprié de l'isolant, et des traitements convenables (séchage, imprégnation, polymérisation), qu'on arrive à obtenir une isolation satisfaisante.

Aux contraintes normales résultant du champ électrique créé par les tensions nominales, s'ajoutent des contraintes accidentelles dues à des surtensions. S'il est relativement facile de déterminer les premières, il est beaucoup moins aisé de connaître l'influence des secondes ; aussi, tout enroulement doit être soumis, avant la mise en service, à une épreuve diélectrique consistant en l'application, entre masse et conducteurs, ou entre conducteurs de phases différentes, d'une tension de nature et de valeur déterminées par les règlements de l'U.T.E. (par exemple : deux fois la tensions nominale plus 1 000 V avec un minimum de 1 500 V pour le matériel normal, pendant 1 minute).

1.41. — CLASSES D'ISOLEMENT ET ISOLANTS UTILISÉS

La tenue d'un enroulement dans le temps est conditionnée essentiellement par le comportement de ses isolants.

Effets des contraintes sur les isolants.

Les contraintes diélectriques ont tendance à provoquer des phénomènes d'ionisation et entraînent un échauffement. De plus, le flux de chaleur en provenance des autres parties de la machine s'ajoute à cet échauffement. Si la chaleur dissipée est inférieure à la chaleur fournie par les pertes, il y a élévation de température et il peut y avoir destruction de l'isolant par claquage thermique (1).

Une autre forme de destruction réside dans le claquage diélectrique (2).

En fonctionnement normal, avec des contraintes appliquées inférieures à celles qui provoquent la destruction, la durée de vie de l'isolant dépend de la température à laquelle il est soumis.

Le tableau III concerne les principaux isolants utilisés dans la construction des bobinages.

---

(1) Voir tome 3, p. 8.
(2) Voir tome 4, chap. Matériaux.

1.42. — CONDUCTEURS

1.421. Métal.

Le métal utilisé doit présenter certaines qualités :

— *résistivité faible afin de réduire les pertes par effet Joule* ;

— *caractéristiques mécaniques* permettant une bonne résistance, un travail de tréfilage et d'étirage facile ;

— *prix de revient modéré.*

Le cuivre, qui répond le mieux à des divers impératifs est universellement employé. Pour faciliter leur mise en forme, les fils sont livrés à l'état recuit.

L'aluminium est utilisé pour les induits en court-circuit de moteurs d'induction, sous forme de métal coulé. Pour obtenir un glissement faible en charge, on emploie de l'aluminium très pur. Quelques tentatives ont été faites pour utiliser l'aluminium en fil ou barres isolés par une couche d'alumine. Ce procédé permet un allégement des machines et une économie sur le prix de revient, mais, dans l'ensemble, la grande majorité des constructeurs est restée fidèle au cuivre.

Enfin, dans des cas très spéciaux, on peut employer exceptionnellement d'autres métaux : *laiton* pour des barres de cages de démarrage sur des moteurs à double cage, *bronze* pour les anneaux de mise en court-circuit des cages d'écureuil, *maillechort* pour certaines spires sur des machines à courant alternatif à collecteur.

1.422. Guipages.

Les fils sont revêtus d'un isolant appelé guipage. On rencontre le plus souvent :

— *une couche d'émail* (généralement émail synthétique : formal-polyvynilique ; phénol-formaldéhyde combiné avec des résines polyamides, urée-formaldéhyde, formalpolyvinylique ; époxydes ; polyuréthanes ; polyesters ; silicones ; polytétrafluoréthylène) ;

— *une couche textile* : soie, coton, rayonne, verre ;

— *un ruban papier.*

Ces guipages qui peuvent être simples ou combinés entre eux sont choisis en fonction de nombreux critères : température admissible, résistance à l'abrasion, surépaisseur, tenue diélectrique, affinité chimique avec le milieu ambiant...

Dans des cas spéciaux et notamment en réparation lorsqu'on réutilise les conducteurs d'origine, on peut être amené à isoler les conducteurs par un ruban dont les spires se recouvrent partiellement. Ce ruban est alors enroulé au moment de la mise en forme des conducteurs.

TABLEAU III. — *Classification des matériaux isolants établie sur la*

(établie d'après la documentation
suivant NF. C 51

Classe	Matière isolante	
	Nature chimique	**Exemple de désignation commerciale**
Y max. 90 °C.	Coton. Soie naturelle. Fibre de cellulose régénérée. Fibre d'acétate de cellulose. Fibre de polyamide. Papier et produits dérivés. Carton isolant. Fibre vulcanisée. Bois. Résines aniline-formaldéhyde. Résines urée-formaldéhyde. Polyacrylates, Polyéthylène, Polystyrène } Peuvent être limités à moins de 90 °C par la température de ramollissement. Chlorure de polyvinyle plastifié ou non. Caoutchouc naturel vulcanisé.	**Fibres.** **Fils Soflex.** Gaines **Soflex.**
A max. 105 °C.	Coton. Soie naturelle. Fibre de cellulose régénérée. Fibre d'acétate de cellulose. Fibre de polyamide Papier et produits dérivés Carton isolant. Fibre vulcanisée. Bois. } Imprégnés ou immergés dans un diélectrique liquide.	Fils **guipés** ou **tressés** (papier, soie, coton, etc). **Tisolite.** **Tisoflex.** Gaines **Soflex.**
	Toiles vernies à base de coton, soie naturelle, cellulose régénérée, acétate de cellulose ou polyamides. Papier verni.	**Toile vernie.** **Soie vernie.** **Papier verni.**
	Stratifié phénoplaste bois.	
	Films d'acétate de cellulose. Films d'acétobutyrate de cellulose. Résines polyesters à chaîne transversale. Emaux oléorésineux des fils émaillés. Emaux à base de résines polyamides des fils émaillés.	**Fils émaillés noirs.** Fils **Duronyl.**

base de leur résistance au vieillissement et de leur stabilité thermique

des Usines Diélectriques de Delle)

- 100 ADD 1

Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 2	**Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé**	**Vernis**
Néant.	Néant.	
Néant.	Vernis à base de résines naturelles et d'huile siccative; gomme laque, copal et autres résines naturelles; solutions ou suspensions d'éthers et d'esters cellulosiques.	**Imprégnation.** **Gras.** **Finition.** **Gras.**
Vernis à base de résines naturelles ou synthétiques et d'huile siccative.	Huiles isolantes et liquides diélectriques synthétiques.	**Spéciaux.** **Semi-conducteur.**
Résines phénol-formaldéhyde.	Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.	
Néant.		

TABLEAU III *(suite).*

Classe	Matière isolante	
	Nature chimique	**Exemple de désignation commerciale**
	Emaux aux résines formal-polyvinyle, polyuréthane ou époxyde, des fils émaillés.	Fils **Thermofix.** Fils **Duroflex.** Fils **Soldex.** Fils **Freodur.**
E	Résines moulées avec charge cellulosique. Stratifiés coton. Stratifiés papier.	Produits **moulés.** **Canevasite.** **Dellite.**
max. 120 °C.	Résines polyesters à chaîne transversale. Films de triacétate de cellulose. Films de téréphtalate de polyéthylène. Fibres de téréphtalate de polyéthylène.	**Enduit.** **Film.** **Myoflex.**
	Toiles vernies à base de téréphtalate de polyéthylène.	
	Fibre de verre. Amiante.	Fils **Silix** imprégné (gras). Fils **Amiante** » »
	Tissu de verre imprégné. Amiante imprégné.	**Vétronites.** **Vétroamiante.** **Myover.** **Amiante Mylar.**
B	Mica aggloméré (seul ou avec un support).	**Micanites** entrelames. **Micanites** moulables. **Micanites** souples. **Micafoliums.** **Rubans micacés.** **Tubes** à base de mica. **Cônes** micanite. Isolants d'**encoches** à base de mica : Micatex. Myomic. **Samicanites** entrelames. **Samicanites** moulables. **Samicanites** souples. **Samicafoliums.** **Rubans samicacés.** Isolants d'**encoches.** à base de Samica : Samicatex. Myosam.
max. 130 °C.		

Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 2	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé	Vernis
Néant.	Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.	**Mêmes Vernis que pour Classe B.**
Résines mélamine formaldéhyde, Phénol formaldéhyde et phénolfurfural.		
Néant.		
Vernis à base de résines alkydes et d'huile.		
Néant.	Asphalte et résines synthétiques avec huile. Résines polyesters à chaîne transversale. Résines époxydes. Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.	**Imprégnation.** **Phénolique gras.** **Aminoplaste.** — — — **Finition.** **Oléosynthétique.** — **Glycérophtal.** **Spéciaux.** **Tôles magnétiques.** — — **Anti-flash.** — **Entre-couches.** — **Sans solvant.** — **Collage.**
Vernis à base de résines synthétiques et d'huile.		
Gomme laque, compounds asphaltiques ou bitumineux. Résines synthétiques modifiées, résines alkydes. Résines polyesters à chaîne transversale. Résines époxydes modifiées.		

TABLEAU III *(suite).*

Classe	Matière isolante	
	Nature chimique	**Exemple de désignation commerciale**
B (suite).	Stratifiés de tissu de verre. Stratifiés amiante. Résines moulées avec charge minérale.	**Silirites.** **Amiantex.** **Prod. moulés.** **Prod. de remplissage.** **Mastic.** Fils **Durotherm.** Fils **Duroflex** sous Silix. Fils **Duroflex** s/Amiante.
F max. 155 °C.	Fibre de verre. Amiante.	Fils **Silix** imprégné (époxy) Fils **Amiante** — —
	Tissu de verre imprégné.	**Vétronites.** **Micanite** Traction. **Micanite** Souple. **Micafolium.** **Rubans Micacés.**
	Mica aggloméré (seul ou avec un support).	**Micatex.** **Samicanite** Traction. **Samicafolium.** **Ruban Samicacé.**
	Le support peut appartenir à une classe de température plus faible, à condition que sa destruction n'entraîne pas la disqualification de l'isolant soit au point de vue mécanique, soit au point de vue électrique.	**Samicatex.** **Amiantie.** **Cales Durestos.** **Silirite.** **Produits moulés alkydes.** Fils **Durotherm.** Fils **Durosil.** Fils **Durotherm** sous Silix.
H max. 180 °C.	Fibre de verre. Amiante.	Fils **Silix** imprégnés (Silico Fils **Amiante** — —
	Tissu de verre imprégné. Amiante imprégné.	**Vétronites.** **Vétroflex.**
	Mica aggloméré (seul ou avec un support).	**Micanite** souple. **Micafolium.** **Rubans Micacés.** **Micatex.**
	Même remarque en ce qui concerne le support que pour la classe F.	**Samicanite.** Traction. **Samicafolium.** **Ruban Samicacé.** **Samicatex.**
	Stratifiés de tissu de verre. Stratifiés amiante.	**Silirite.** **Amiantex.**

Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 2	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé	Vernis
Résines mélamine formaldéhyde. Résines phénolformaldéhyde. Résines polyesters à chaîne transversale.		
Néant.		
Résines **alkydes,** époxydes, polyesters à chaîne transversale et polyuréthanes ayant une stabilité thermique élevée. Résines **silicone-alkyde.**	Résines alkydes, époxydes, polyesters à chaîne transversale et polyuréthanes, ayant une stabilité thermique élevée. Résines silicone-alkyde. Matières mentionnées dans une classe de température plus élevée.	**Imprégnation et Finition.** **Polyuréthane.** **Silicone modifié.** **Polyépoxy.** **Polyépoxy.** (entrecouches)
Néant.		
Résines silicones **sélectionnées.** Elastomères de silicones.		
Résines silicones sélectionnées.	Résines silicones **sélectionnées.**	**Silicone.** — (Collage.)

TABLEAU III *(suite).*

Classe	Matière isolante	
	Nature chimique	**Exemple de désignation commerciale**
H (suite).	Elastomères de silicones.	Gaines **Silastic.** Fils **Durotherm.** sous Silix Silicone. Fils **Durosil** Sous Silix Silicone.
C > 180 °C.	Mica.	**Samicanite.**
	Porcelaine ou matières céramiques. Verre. Quartz. (La température de fonctionnement maximale peut être limitée par les propriétés physiques, chimiques ou électriques.)	**Samicanite.**
	Tissu de verre traité. Amiante traité. Mica aggloméré.	
	Polytétrafluoréthylène **.	**Fils émaillés Téflon***. **Fils guipés Téflon***. **Vétronite.**
	Alumine des fils et rubans d'aluminium oxydés.	

* Sauf avis contraire du constructeur, la température limite d'emploi ne doit pas dépasser 225 °C.

** Sauf avis contraire du constructeur, la température limite d'emploi ne doit pas dépasser 250 °C.

*** Marque déposée DU PONT DE NEMOURS.

La classe spécifiée dans la colonne 1 vise les ensembles définis en regard par les colonnes 2. 3. 4. et non les produits individuels mentionnés dans l'une ou l'autre de ces colonnes.

Les matières d'agglomération, d'imprégnation ou de revêtement mentionnées dans la colonne 3 sont celles utilisées par le fabricant des produits isolants indiqués dans la colonne 2.

Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 2	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé	Vernis
Néant.	Résines silicones **sélectionnées.**	**Silicone.** — (Collage.)
Néant.	Liants inorganiques tels que verre ou ciment.	
Résines silicones possédant une stabilité thermique élevée*.	Résines silicones possédant une stabilité thermique élevée*.	
Néant.	Néant.	

Les matières d'imprégnation mentionnées dans la colonne 4 sont celles utilisées par le constructeur électricien pour le traitement des enroulements et des appareils. Dans une classe déterminée, il lui appartient de choisir parmi les matières de la colonne 4 celle qu'il convient d'associer avec les produits choisis dans les colonnes 2 et 3.

Les matières mentionnées dans les colonnes 3 et 4 de ce tableau peuvent souvent être limitées par des facteurs autres que la stabilité thermique, tels que les propriétés mécaniques à la température de fonctionnement. Par exemple, certaines résines époxydes sous contrainte mécanique élevée peuvent souvent être limitées à la température de la classe A.

Les désignations commerciales figurant sur ce tableau, sont données à titre d'information.

1.423. Sections.

Du point de vue dimensions, les différentes sections de fil sont normalisées. Les valeurs courantes vont de 0,002 mm² à quelques dizaines de millimètres carrés.

Quant aux formes, on emploie :

— les *fils ronds* de 0,05 mm à 3 mm environ ;

— les *fils méplats* pour les sections élevées ; cette forme permet un meilleur rangement et, par suite, un gain de place. Les angles sont arrondis afin de permettre une bonne tenue du guipage.

1.43. — DISPOSITION DES ENROULEMENTS

On peut distinguer deux grands groupes d'enroulements, suivant qu'ils sont réalisés sur des pôles saillants ou logés dans des encoches.

1.431. Enroulements sur pôles saillants.

Ils constituent les bobinages inducteurs des machines à courant continu et des alternateurs à pôles saillants.

Les enroulements fixes ne sont soumis à aucune contrainte mécanique et leur mise en place demande peu de précautions.

La *figure* 55 indique la coupe d'un tel bobinage.

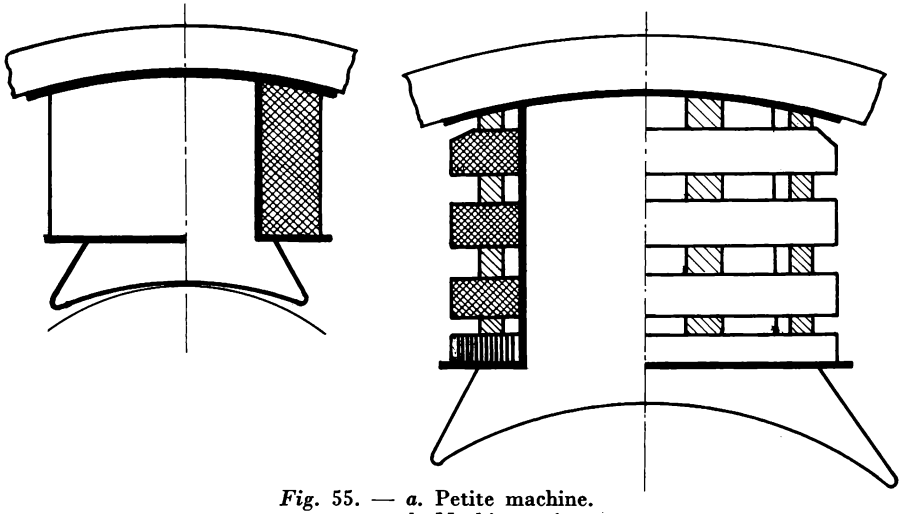


Fig. 55. — *a.* Petite machine.
b. Machine puissante.

Suivant l'intensité mise en jeu, ils sont réalisés en fil rond ou méplat. Leur forme extérieure est déterminée de façon à s'adapter au mieux à l'espace disponible.

◆ **Petites machines.** Les fils sont maintenus par un enrubannage et isolés de la masse par des cartons. Le calage s'obtient par des cartons glissés entre le noyau et la bobine.

◆ **Machines puissantes.** On a recours à une subdivision du bobinage de façon à augmenter la surface de refroidissement.

Les enroulements tournants sont soumis à des efforts centrifuges. Des systèmes de calage sont prévus pour résister à ces efforts (*fig.* 56).

1.432. Enroulements logés dans des encoches.

Les indications qui suivent ne concernent pas les schémas de bobinage. Elles s'appliquent uniquement à la disposition des conducteurs à l'intérieur et à l'extérieur des encoches. Il faut regretter que la terminologie soit quelquefois assez vague et mal fixée. Nous nous efforcerons, chaque fois que ce sera possible, de donner tous les termes synonymes employés (1), mais nous emploierons, par la suite, les termes préconisés par l'U.T.E. ou les plus utilisés dans la pratique.

◆ **Disposition des conducteurs à l'intérieur des encoches.**

On appelle assez souvent, *faisceau*, la partie des conducteurs placée à *l'intérieur de l'encoche*. Il existe deux variantes :

— Tous les conducteurs d'une même encoche forment un seul *ensemble*, un seul *faisceau* : on dit alors qu'il s'agit d'un *bobinage à un rang*, ou *une couche*, ou *un étage*. On rencontre ce cas dans beaucoup de machines à courant alternatif. L'ensemble des fils occupant deux encoches complètes et que l'on peut mettre ou retirer sans toucher aux autres conducteurs forme une *bobine* (*fig.* 57 *a*).

— Les conducteurs d'une même encoche sont répartis en deux faisceaux superposés. C'est le cas de toutes les machines à collecteur et de certains enroulements à courant alternatif. L'enroulement est alors dit à *deux couches*, ou *deux rangs*, ou *deux étages*, ou encore à *demi-bobine*. Sur un enroulement à collec-

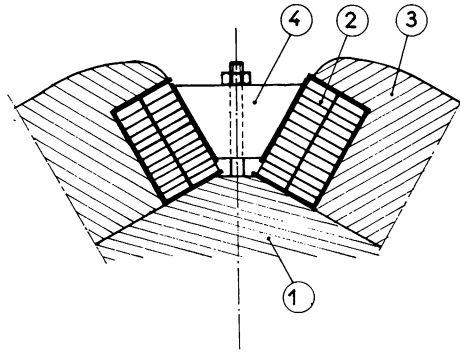


Fig. 56.
1. Moyeu.
2. Bobinage.
3. Noyau polaire.
4. Coin de calage.

(1) Consulter aussi le Vocabulaire électrotechnique. Groupe 10. Machine et transformateurs. Norme U.T.E. C 01-010.

teur, les fils de chaque rang forment un ou plusieurs circuits identiques dont les extrémités sont reliées aux lames du collecteur. Chacun des circuits relié à deux lames de collecteur forme une *section*. Dans le cas où plusieurs sections sont dans la même encoche, il est possible de fermer et d'isoler ensemble les différentes sections de la même couche : elles forment alors une *bobine*. En courant alternatif, il est rare qu'on emploie le terme de section ; on lui préfère celui de *demi-bobine* (*fig.* 57 *b*).

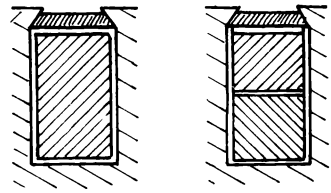


Fig. 57.

Dans les machines à courant alternatif, à partir d'une certaine puissance, les intensités mises en jeu obligent à prévoir des sections considérables. La répartition du flux dans la section de l'encoche n'est pas homogène et il en résulte des pertes supplémentaires dans le cuivre ; l'effet pelliculaire oblige à prévoir plusieurs conducteurs en parallèle isolés les uns des autres. De plus, dans un alternateur, la nécessité d'obtenir une forme de courant sinusoïdale est impérieuse. Pour résoudre au mieux tous ces problèmes, on dispose les conducteurs de telle sorte que chacun d'eux occupe successivement toutes les positions possibles dans l'encoche. On obtient ainsi les *barres à conducteurs transposés*.

— *Barre Punga*. Chaque conducteur élémentaire a une épaisseur assez faible, de l'ordre de 2 mm environ, et se trouve disposé « à plat » dans l'encoche. Dans le sens axial, il est disposé obliquement par rapport au fond de l'encoche. Partant du fond de l'encoche, il atteint, en un certain endroit, le sommet de l'encoche, et repasse brusquement dans le fond pour reprendre sa position oblique. Chaque conducteur est ainsi transposé une fois, et, pour un nombre n de conducteurs, le nombre de transpositions totales atteint n-1. L'ensemble est gainé ou enrubanné de façon à former une barre rigide avant la mise en encoche (*fig.* 58).

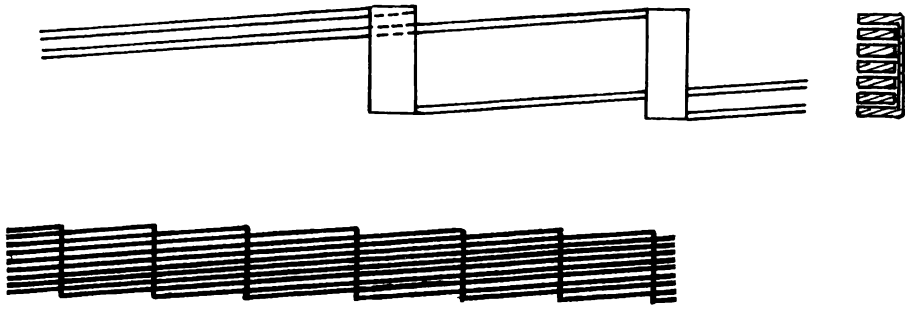


Fig. 58.

— *Barre Roebel.* C'est la plus fréquemment employée. Les conducteurs élémentaires sont répartis en deux couches à l'intérieur de la barre. Une couche comprend des conducteurs ascendants et la couche voisine des conducteurs descendants. Le passage de la partie supérieure de la barre à la partie inférieure ne se fait pas brutalement comme dans la barre Punga, mais progressivement, chaque conducteur passant d'une couche à l'autre lorsqu'il change de pente. Dans certains alternateurs récents de très grande puissance, les barres Roebel comprennent des conducteurs pleins et quelques conducteurs creux à l'intérieur desquels circule le liquide de refroidissement. On imagine aisément la complexité d'une telle fabrication (*fig.* 59 et 60).

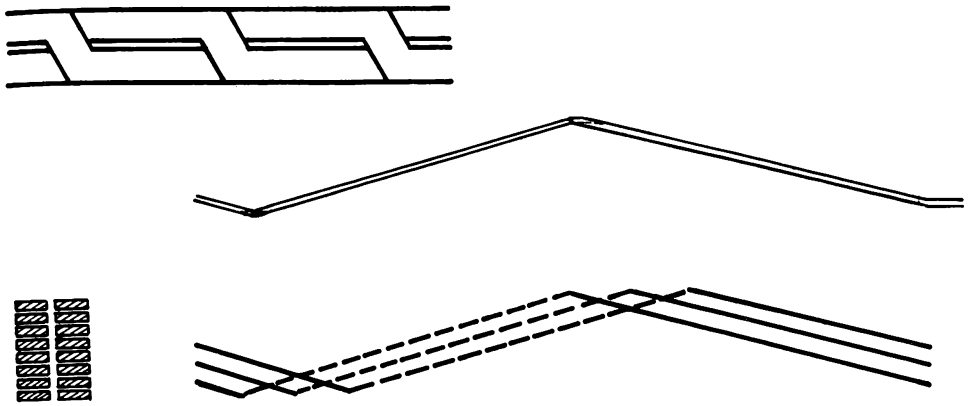


Fig. 59.

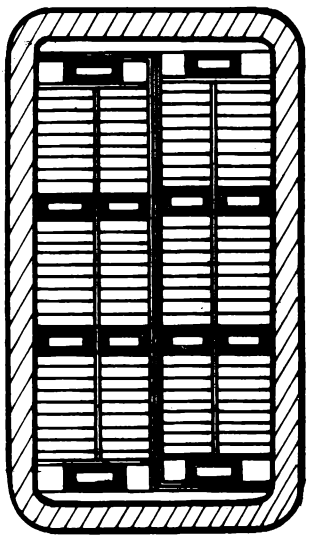
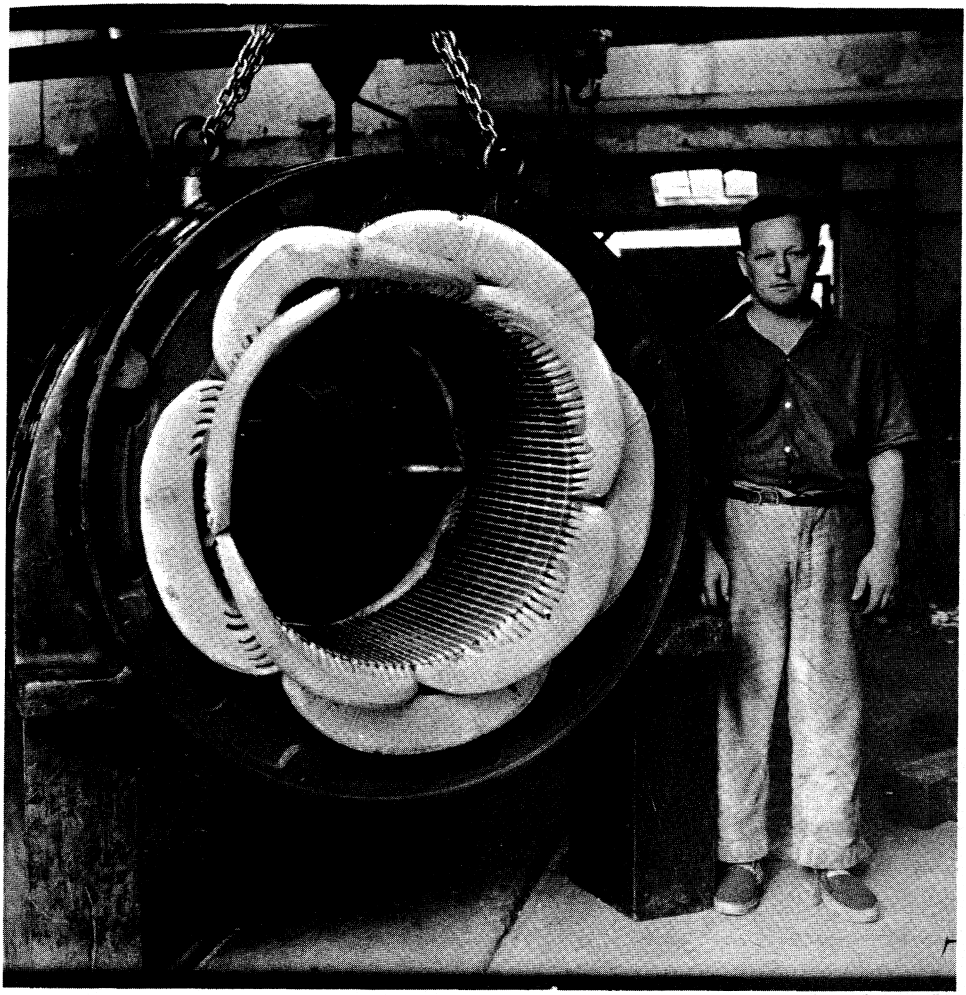


Fig. 60. — Coupe d'une barre Roebel avec conducteurs creux à circulation de liquide.

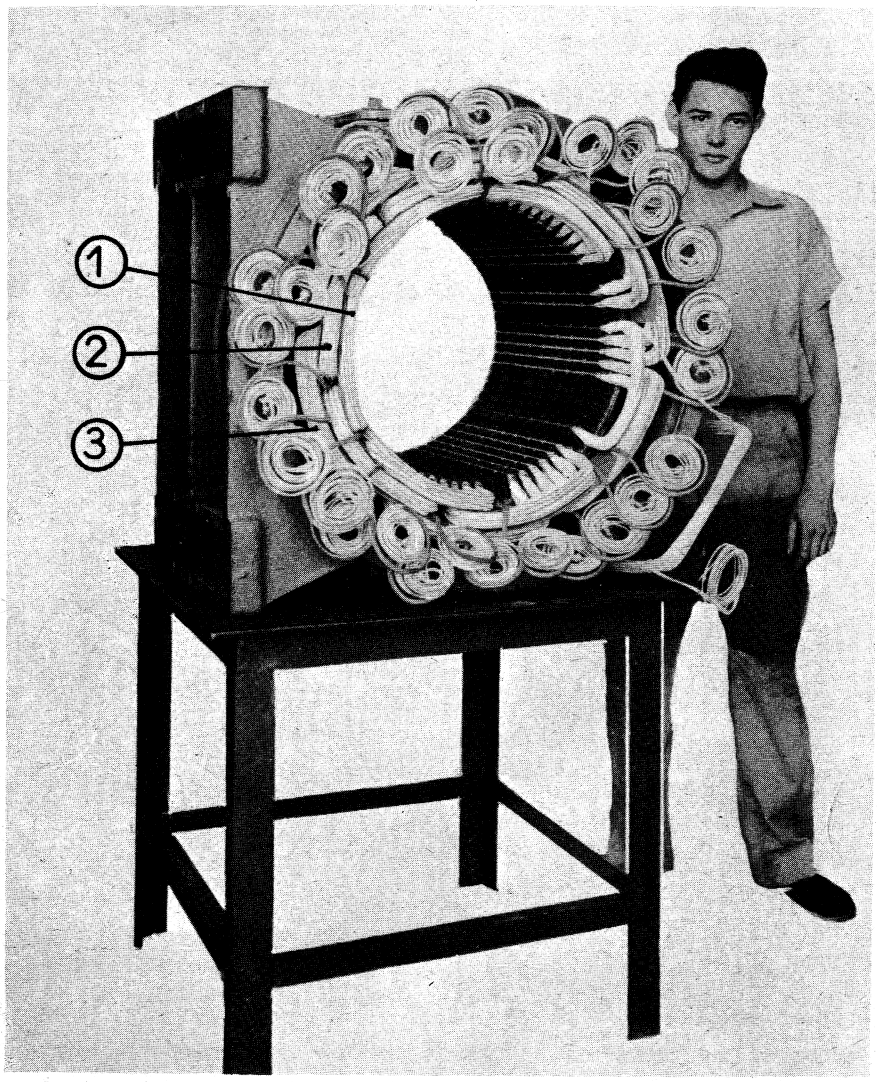
(Cliché C.E.M. - Rep. Elec.)

Fig. 61 *a.* — Bobinage disposé sur deux plans.



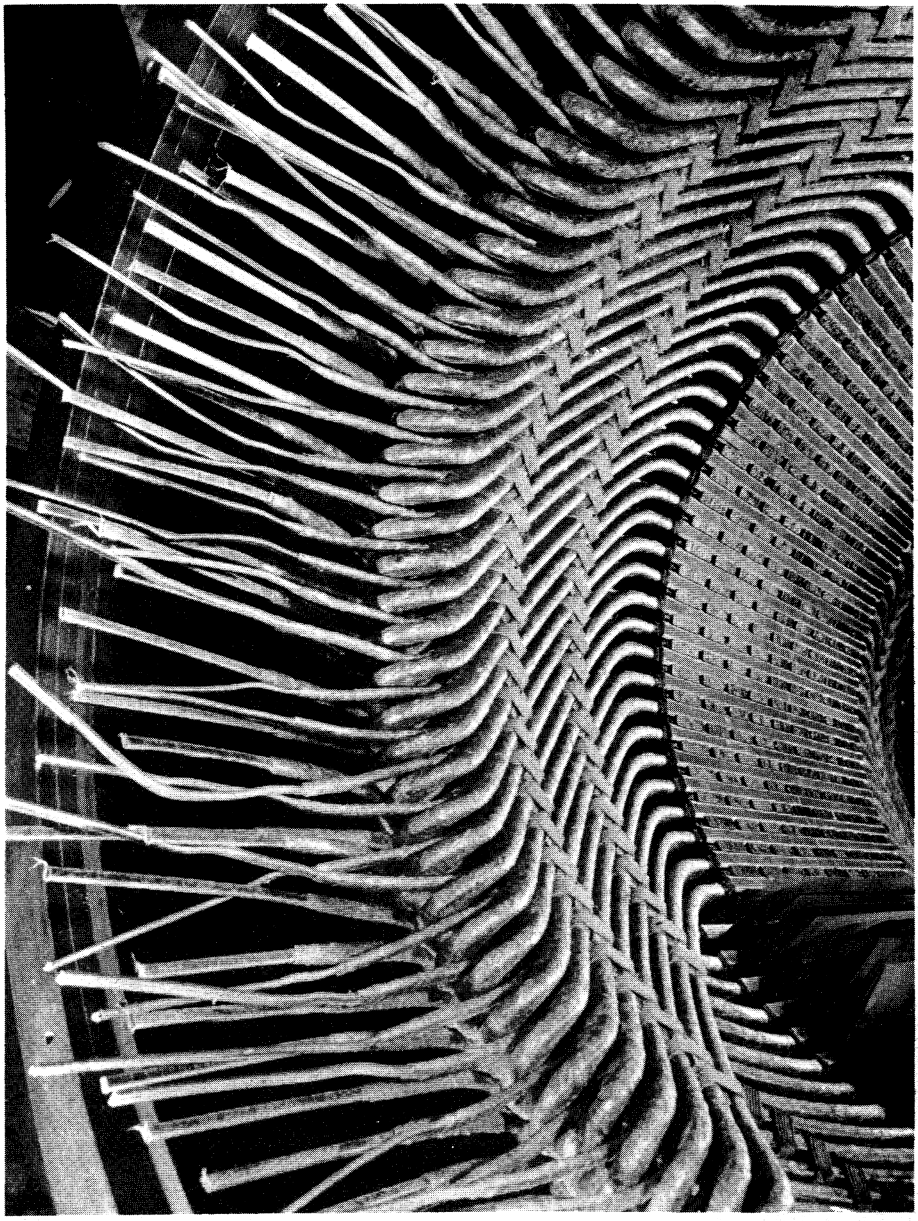
(Cliché C.E.M. - Rep. Elec.)

Fig. 61 *b.* — Enroulement à deux plans avec un groupe mixte.
Remarquer le groupe mixte situé à la partie supérieure gauche.



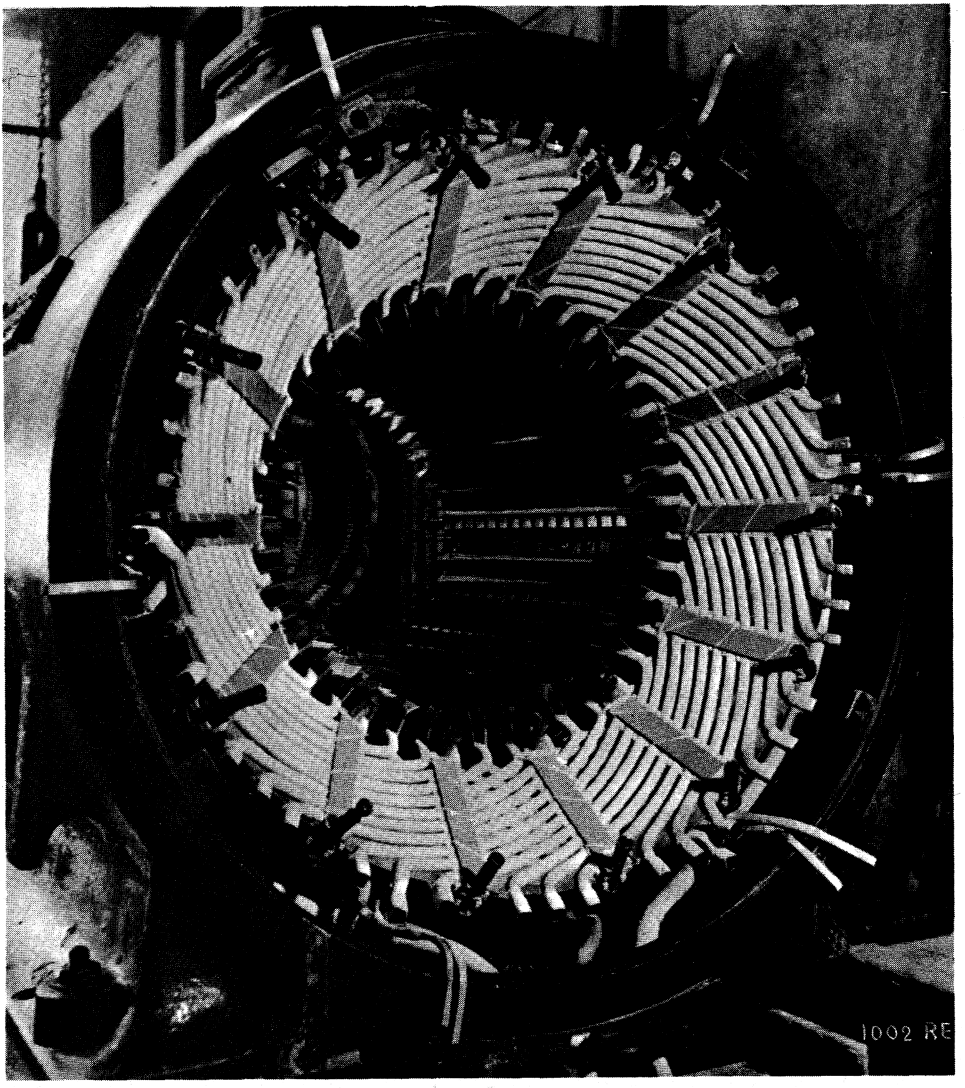
(Cliché C.E.M. - Rep. Elec.)

Fig. 62. — Bobinage sur trois plans.
1. Plan de dessus.
2. Plan médian.
3. Plan de dessous.



(Doc. La Photothèque.)

Fig. 63. — Bobinage enchevêtré par demi-bobines (dit en manteau ou américain).



(Cliché C.E.M. - Rep. Elec.)

Fig. 64. — Bobinage à développantes.

◆ **Disposition des conducteurs à l'extérieur des encoches.**

La partie à *l'extérieur des encoches* constitue les *connexions frontales*, ou *têtes de bobines*, ou *chignons*.

Ces chignons peuvent être disposés suivant plusieurs principes :

— *Bobinage à plans.* Utilisés sur les stators alternatifs et certains rotors de machines asynchrones, les enroulements à plans se développent sur des nappes de révolution autour de l'axe de la machine. On peut avoir un seul plan pour les enroulements monophasés, mais les enroulements triphasés sont répartis sur deux ou trois plans. Sur les bobinages à plans, un certain nombre *de bobines* de dimensions différentes sont *concentriques* les unes aux autres et forment un *groupe* (*fig.* 61 *a*, 61 *b*, 62).

— *Bobinage enchevêtré.* Il est possible de disposer les chignons de telle sorte qu'à la sortie de chaque encoche les fils partent dans des directions différentes. Si, de plus, l'enroulement est à une seule couche, on obtient le bobinage *enchevêtré à bobine simple.*

Dans les bobinages à deux couches, un côté de chaque section occupe la partie inférieure de l'encoche et l'autre côté la partie supérieure. Les chignons supérieurs sont parallèles entre eux et les chignons inférieurs également et l'ensemble constitue un bobinage *enchevêtré par demi-bobine.* Si, de plus, les chignons se développent ailleurs que dans un plan parallèle au plateau de serrage des tôles, on appelle également ce bobinage, *bobinage en manteau* ou *bobinage américain* (*fig.* 63).

— *Bobinage à développantes.* Cette appellation s'applique aux enroulements dans lesquels les têtes de bobine se développent dans un plan parallèle au plateau de serrage des tôles, c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe de la machine (*fig.* 64).

1.5. — ORGANES DE PRISE DE COURANT

La liaison des enroulements tournants aux circuits fixes s'effectue par l'intermédiaire d'organes de prise de courant. Ils comprennent :

— Une *partie fixe* constituée par un *balai* et son support, le *porte-balai* ; les balais sont quelquefois appelés à tort « charbons ».

— Une *partie mobile* pouvant se présenter sous deux formes très différentes :

• *bague* massive, lorsqu'il s'agit de *conduire* uniquement le courant : excitation des alternateurs à inducteurs tournants, rotors de moteurs asynchrones ;

• *collecteur* formé par les lames de cuivre isolées les unes des autres, lorsqu'il y a simultanément *conduction* et *commutation* : machines à courant continu et certaines machines à courant alternatif.

1.51. — BALAIS ET PORTE-BALAIS

1.511. Les balais.

Ils ont été étudiés dans le tome 3 en ce qui concerne leur comportement en tant que contact. Nous ajouterons simplement que sur les machines à commutation difficile, le montage de balais divisés apporte des améliorations dans le fonctionnement :

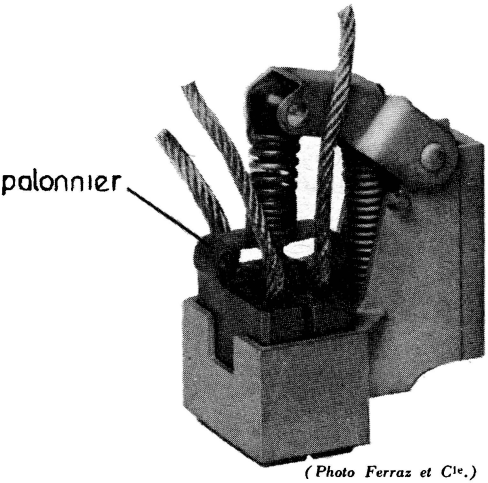
— *sensibilité moindre aux irrégularités du collecteur ;*

— *inertie moindre pour chaque demi-balai ;*

— *meilleure surface de contact sur le collecteur ;*

— *échauffement moindre.*

La pression assurée par un seul ressort est égalisée sur chacun des balais par une pièce d'appui isolante ou un palonnier élastique (*fig.* 65).



(Photo Ferraz et Cie.)

Fig. 65. — Cage porte-balai normalisée, série Vjf (norme UTE. C. 51903) avec système d'appui à palonnier pour balais jumelés.

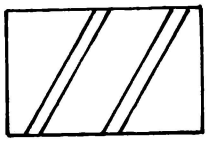


Fig. 66.

Lorsque les balais sont nombreux et rapprochés, la ventilation peut être difficile et les balais chauffent irrégulièrement, ce qui entraîne une répartition inégale du courant. Le fonctionnement est amélioré par des rainures pratiquées dans la face de contact des balais ; ces rainures sont inclinées par rapport à une face latérale (*fig.* 66).

1.512. Porte-balais.

Leur rôle essentiel est de maintenir le balai en contact avec le collecteur. Etant donné l'importance du contact balai-collecteur sur le fonctionnement de la machine, le porte-balai doit répondre à certaines conditions impératives telles que :

- — *maintien du contact* sans pression exagérée quelles que soient les vibrations ou les légers défauts de l'état de surface ;
- — *position invariable* du balai par rapport au collecteur pendant toute la plage normale d'usure du balai ;
- — *frottement réduit* entre balai et porte balai pour permettre au balai de suivre les petits mouvements du collecteur ;
- — *possibilité de réglage* radial de façon à toujours guider le balai le plus près possible du collecteur, malgré l'usure de ce dernier ;
- — *transmission du courant* sans détérioration des divers éléments composant le porte-balai ;
- — éventuellement, *possibilité de réglage* et de remplacement d'un balai en marche, sans danger pour l'opérateur.

◆ **Différents types.**

— *Porte-balai à pince* : d'un modèle très ancien, il est pratiquement abandonné à cause de sa grande inertie, mais on le trouve encore sur de vieilles machines. L'ensemble balai-pince pivote autour d'un axe par l'intermédiaire d'une fourrure. Un ressort plat, ou à boudin, lié à la fourrure, agit sur la pince (*fig.* 67).

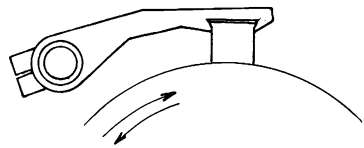


Fig. 67. — Porte-balai à pince.

— *Porte-balai à gaine* : il présente, par rapport au porte-balai à pince, l'avantage d'avoir une inertie réduite, puisque seul le balai est mobile Les variantes d'exécution sont nombreuses mais, dans tous les cas, la pression est assurée soit par un ressort à boudin, soit par un ressort spirale ; on évite soigneusement le passage du courant à travers le ressort.

Les *figures* 68 montrent les types les plus courants.

Le porte-balai à gaine radiale supporte des vitesses de 15 m/s environ. Le porte-balai incliné permet de réduire les forces de frottement contre la gaine ; la face supérieure du balai est perpendiculaire aux parois de la gaine et la pression du ressort s'exerce dans l'axe du balai. Dans le porte-balai à réaction, la face supérieure du balai est oblique et la poussée du ressort s'exerce perpendiculairement à cette face. Les porte-balais à pompe, en amortissant les vibrations, permettent des vitesses élevées de collecteur.

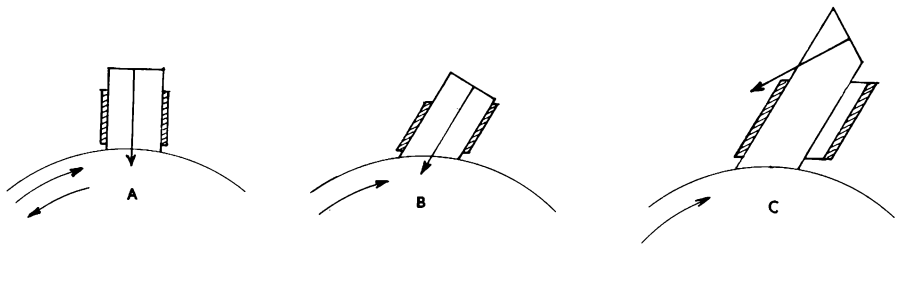


Fig. 68. — Porte-balais à gaine.
a. Radiale.
b. Inclinée.
c. A réaction.
d. A ressort amortisseur.

Lorsque la machine est soumise à des inversions fréquentes de sens de rotation, le balai bascule à chaque inversion et ne porte d'abord sur le collecteur que par une arête. La réduction du jeu entre gaîne et balai permet de réduire ce basculement, mais un jeu insuffisant présente des inconvénients car le balai peut arriver à se coincer sous l'effet des poussières, de dilatations, de gonflement, etc. La surface portante du balai est constamment modifiée et la ligne de commutation déplacée.

Pour éviter tous ces inconvénients on utilise des porte-balais dans lesquels le doigt de pression, en forme de came, appuie en porte-à-faux à la partie supérieure du balai sur une plaquette débordant de cette face supérieure (1) (*fig.* 70). Le point d'appui, la forme de la came, la force du ressort et la trajectoire de portée de la came sur la plaquette sont déterminés de façon que le balai soit constamment basculé dans le même sens.

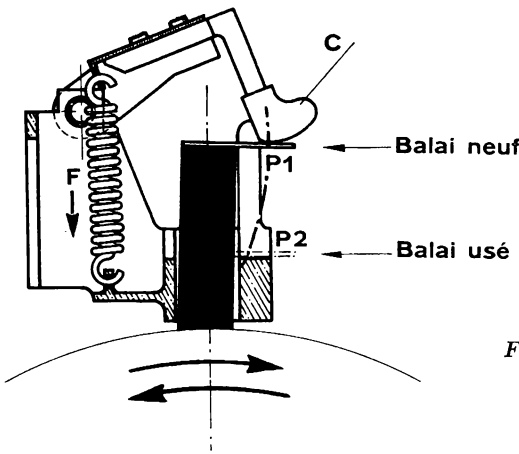
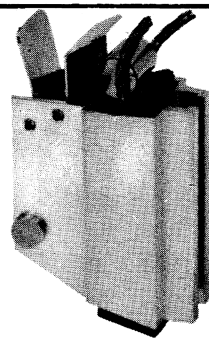
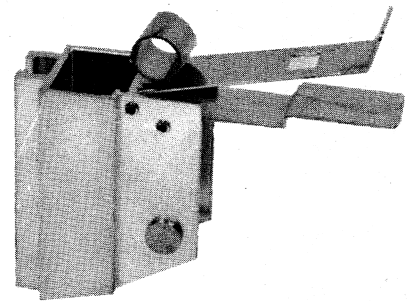


Fig. 70. — Porte-balai système Rauhut.
C. Came.
F. Effet du ressort.

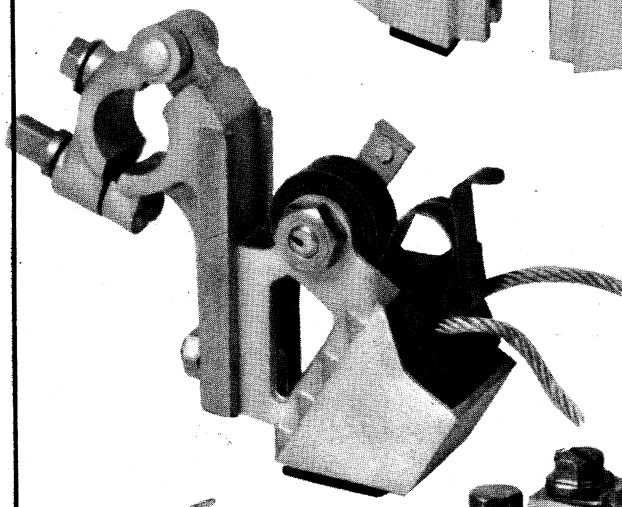
(Document Ferraz.)





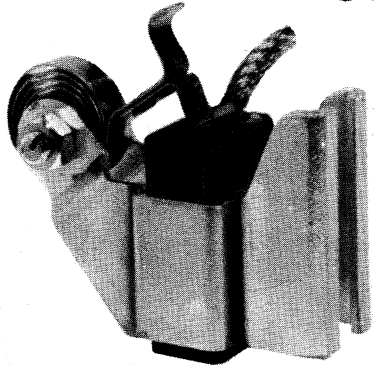
Cage porte-balai à ressort à ruban, rouleau, balai incliné, type « trailing ».

(Photo Ferraz et Cie.)



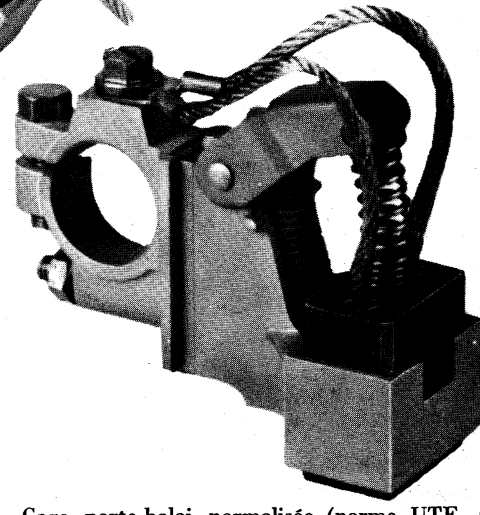
Cage porte-balai « à réaction » montée sur collier-support articulé.

(Photo Ferraz et Cie.)



Cage porte-balai série « marine ».

(Photos Ferraz et Cie.)



Cage porte-balai normalisée (norme UTE. C. 51 903) montée avec collier-support monobloc.

Fig. 69. — Porte-balais pour collecteur à lames.

— *Porte-balais tubulaires.* Utilisés dans les très petites machines, ils se présentent sous la forme d'un cylindre fixé rigidement au flasque par collier ou vissage et reçoivent des balais à section circulaire ou rectangulaire. Le ressort assurant la pression de contact est maintenu par un bouchon ou une plaquette placés à la partie supérieure du cylindre (*fig.* 71).

◆ **Montage des porte-balais.**

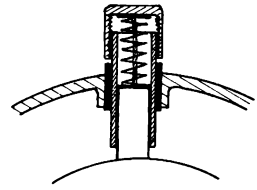


Fig. 71.

— *Collecteur à lames.*

Le dispositif de montage doit répondre aux conditions suivantes :

• possibilité de réglage par rapport aux plans neutres de la machine pour faciliter le calage ;

• possibilité de réglage radial ;

• rigidité pour ne pas se déformer sous l'effet des vibrations et ne pas les amplifier ;

• isolation des porte-balais par rapport à la masse.

En général, les porte-balais sont fixés par l'intermédiaire d'un collier de serrage sur un tige de section circulaire ou carrée. Lorsque l'intensité l'exige, plusieurs porte-balais sont disposés sur la même tige et affectés à la commutation des mêmes sections ; ils constituent une *ligne* de porte-balais. Les lignes de même polarité sont connectées en parallèle.

L'ensemble des tiges est monté sur une couronne fixée elle-même sur le flasque, ou sur la culasse si la machine possède des paliers séparés. La couronne peut tourner autour de l'axe de la machine pour permettre le calage des balais.

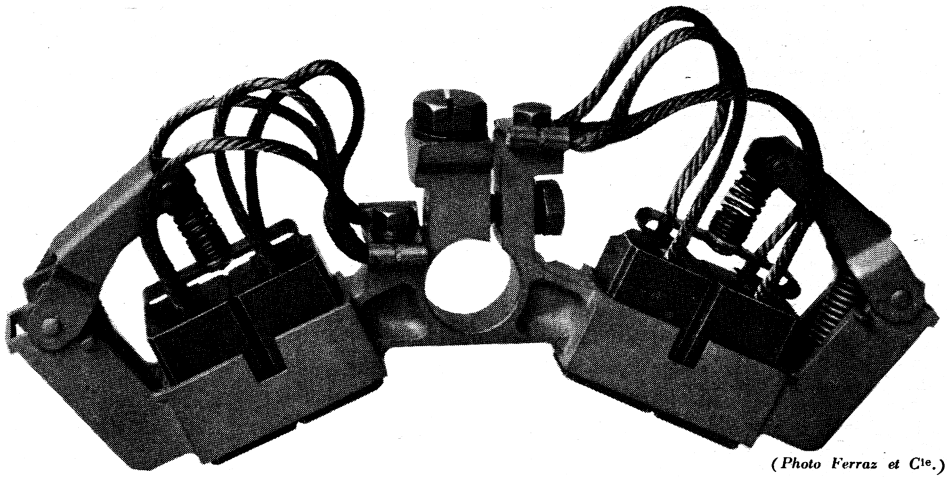
— *Blocs de bagues.* Par rapport au collecteur à lames, on relève les différences suivantes :

• le *réglage* par rapport aux pôles n'est plus nécessaire. La couronne peut être fixe, ou même on peut monter les porte-balais directement sur le flasque ;

• les *porte-balais* montés sur une même tige doivent être isolés l'un par rapport à l'autre puisqu'ils appartiennent à des phases différentes ;

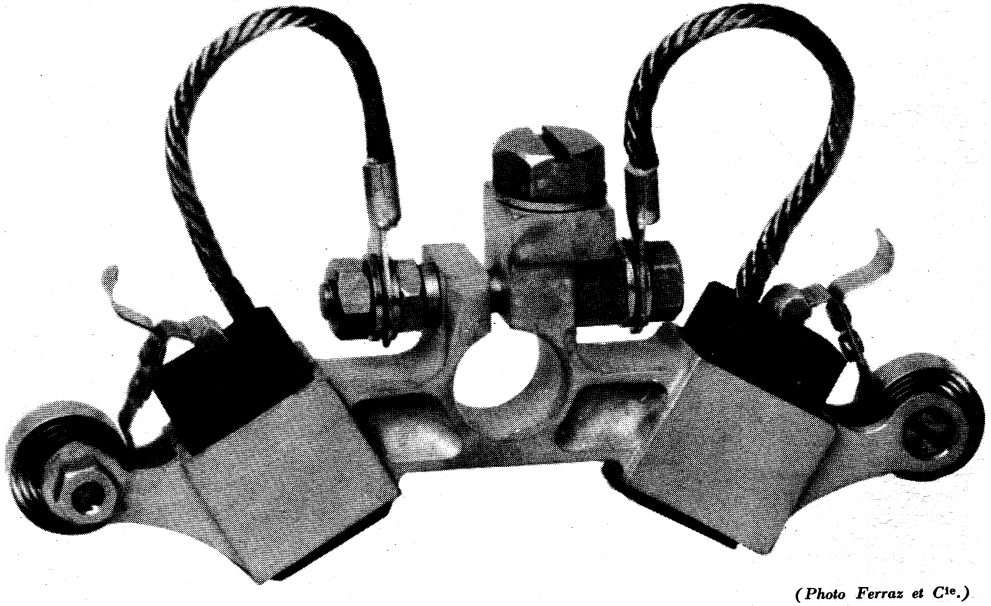
• si plusieurs *balais sont nécessaires* sur la même bague, ils peuvent être montés en n'importe quel point de la bague. Une solution simple consiste à utiliser des porte-balais doubles fixés sur la même tige (*fig.* 72 et 73).

(1) Porte-balais système Rauhut.



(Photo Ferraz et Cie.)

Fig. 72. — Porte-balais monobloc double pour bagues de grandes dimensions avec système de pression à palonnier pour balais jumelés.



(Photo Ferraz et Cie.)

Fig. 73. — Porte-balais monobloc double pour bagues de grandes dimensions à balai unique par cage.

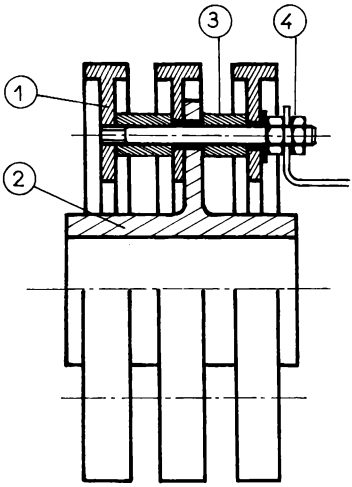


Fig. 74.

1. Bague.
2. Moyeu.
3. Entretoise isolante.
4. Tige d'assemblage et de connexion.

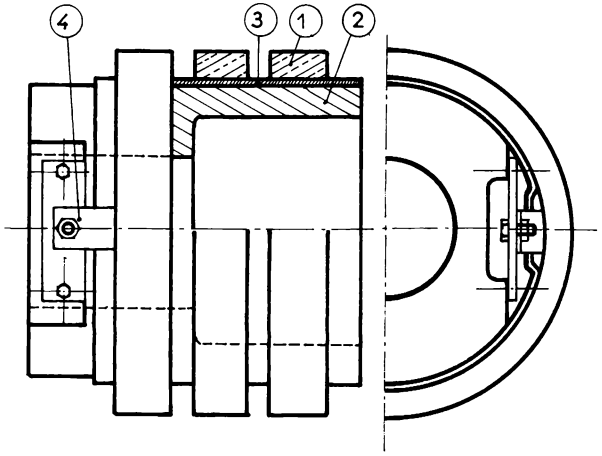


Fig. 75. — 1. Bague.
2. Moyeu.
3. Isolant.
4. Connexion.

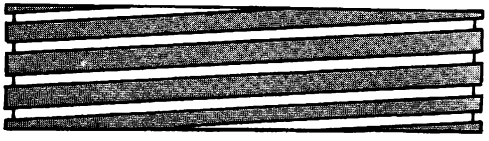


Fig. 76.

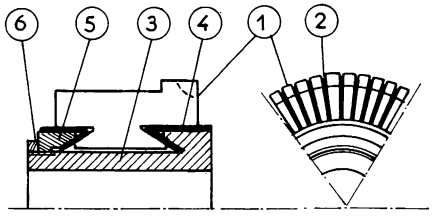


Fig. 77. — 1. Lame.
2. Entrelame.
3. Manchon.
4. Cône isolant.
5. Cône de serrage.
6. Ecrou de serrage.

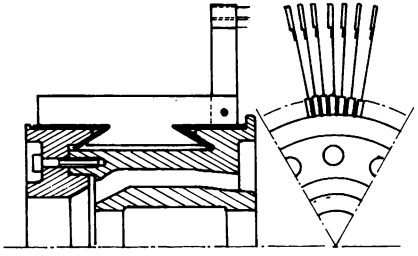


Fig. 78.

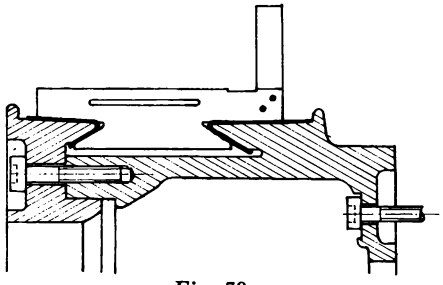


Fig. 79.

Sur certains moteurs, il est prévu un relevage des balais en fin de démarrage, combiné avec la mise en court-circuit du bobinage du rotor.

1.513 Collecteurs à bagues.

Ils comportent une bague par phase ou par polarité solidaire mécaniquement de l'arbre, mais isolée électriquement. Les bagues sont en fonte, en acier, ou, le plus souvent, en bronze phosphoreux.

Leur montage s'effectue sur un manchon claveté sur l'arbre. Pour les faibles vitesses de rotation, les assemblages sont effectués par boulons. Certains, reliés électriquement par vissage ou serrage entre écrous sur une bague et isolés des autres, assurent la liaison entre bague et bobinage (*fig.* 74). Cette disposition permet une tenue correcte jusqu'à 12 ou 15 m/s. Pour des vitesses supérieures, les bagues sont montées à chaud sur un manchon par l'intermédiaire d'une bande isolante (papier bakélisé collable à chaud, ou micanite). La liaison électrique se fait, soit par des boulons, soit par des bandes de cuivre brasées sur les bagues (*fig.* 75).

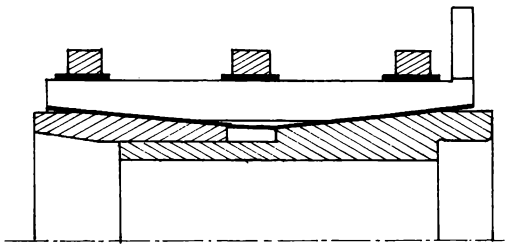


Fig. 80.

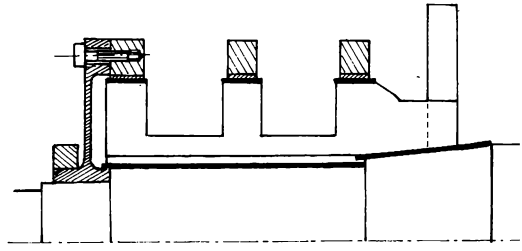


Fig. 82.

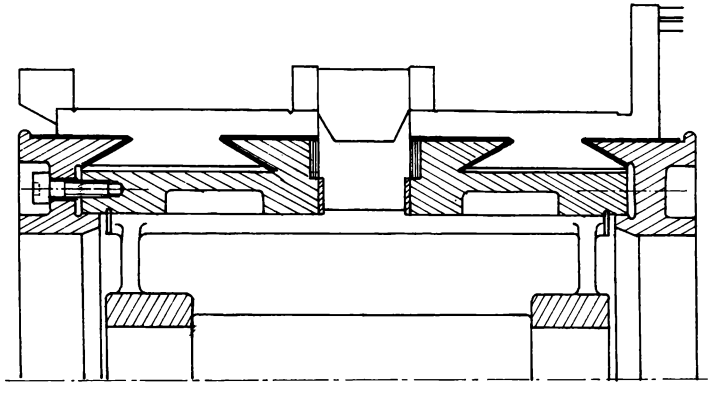


Fig. 81. — Collecteur double pour grosse machine.
Remarquer le montage du collecteur sur croisillon, les ailettes de ventilation à l'extrémité des lames, les ailettes de ventilation à la jonction des deux collecteurs, les dimensions importantes des radiales.

Dans le cas des turbo-alternateurs, les bagues sont montées sur l'arbre sans l'interposition d'un manchon.

Les bagues fonctionnant à grande vitesse sont fréquemment rainurées sur leur surface portante. Les rainures hélicoïdales, larges de 2 à 3 mm et profondes de 3 à 4 mm, sont au nombre de 2 à 4 avec un pas variant de 6 à 12 mm (*fig.* 76). On améliore ainsi le portage des balais ; le refroidissement et l'expulsion des poussières se trouve facilités. La densité de courant et la pression de contact se trouvent augmentées du fait de la diminution de la surface portante sur la bague. Afin d'égaliser l'usure sur le balai et sur la bague, il est indispensable de choisir une largeur de balai égale à un multiple ou un sous-multiple du pas de l'hélice, y compris la largeur de la rainure.

1.514 Collecteurs à lames.

◆ **Principe de montage.**

La *figure* 77 indique le principe de montage d'un collecteur pour machine de faible puissance. Les lames à section trapézoïdale, en cuivre écroui, ont une épaisseur comprise entre 1,5 et 5 mm. Elles sont séparées par des entre-lames isolantes en micanite ou ambérite (aggloméré à base de clivures de mica et de vernis) d'une épaisseur de 0,8 à 2 mm. Le montage sur le manchon se fait par l'intermédiaire de cônes isolants en micanite. Les lames peuvent être constituées par deux épaisseurs de cuivre.

◆ **Différents types.**

— *Collecteurs axiaux.* Dans les très petites machines, la construction est simplifiée par l'utilisation des procédés de moulage. Les lames sont prises dans une matière moulée qui assure l'isolation entre lames et forme le manchon.

Lorsque le diamètre du collecteur est sensiblement égal à celui de l'induit, les connexions sont réalisées par brasage à l'étain des conducteurs dans des entailles pratiquées sur le talon des lames. Si le diamètre de l'induit est nettement supérieur à celui du collecteur, on rapporte sur celui-ci des ailettes appelées « radiales ». Ces radiales sont rivées ou brasées sur le talon des lames (*fig.* 78).

Dans les très grandes machines, la construction est allégée par la suppression du manchon claveté sur l'arbre. Les lames sont montées sur le prolongement de la couronne d'induit ou sur le croisillon par l'intermédiaire d'une couronne (*fig.* 79). On peut également prévoir une ventilation du collecteur en rapportant des ailettes sur le bec des lames.

— Pour les intensités très élevées, la longueur des lames deviendrait telle que leur flexion, sous l'effet des forces centrifuges, serait à craindre. Deux solutions sont alors utilisées :

• *Collecteur fretté* : le principe est illustré par la *figure* 80. Les frettes en acier forgé sont posées à chaud par-dessus une couronne isolante à base de mica ;

• *Collecteur multiple* : il s'agit en fait de deux ou trois collecteurs montés côte à côte et dont les lames sont réunies par des ailettes (*fig.* 81).

— *Collecteur radial.* Au lieu de frotter sur les génératrices du collecteur, les balais portent dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. De tels collecteurs sont frettés et leur montage est identique à celui des collecteurs non radiaux (*fig.* 82).

1.6. — REFROIDISSEMENT

La puissance d'une machine est essentiellement limitée par sa température. Or, la température est liée à la quantité de chaleur dégagée à l'intérieur de la machine sous l'effet des pertes et à la quantité de chaleur évacuée à l'extérieur de la machine. On voit dès lors tout l'intérêt du refroidissement des machines.

1.61. — ORIGINE ET PROPAGATION DE LA CHALEUR

Les différentes pertes génératrices de chaleur apparaissent :

— *dans les conducteurs* sous forme *d'effet Joule*, et à un degré moindre, sous l'effet des *courants de Foucault ;*

— *dans le fer*, où elles sont provoquées par les *courants de Foucault* et par le phénomène *d'hystérésis ;*

— dans les *parties mécaniques* soumises *à frottement* : tourillons, pivots, butées ;

— dans les *isolants* sous forme de *pertes diélectriques* où elles sont généralement assez minimes.

Toute cette chaleur a d'abord pour effet d'élever la température de la machine jusqu'à une certaine valeur dite *température d'équilibre* à partir de laquelle la puissance évacuée à l'extérieur est égale aux pertes apparaissant à l'intérieur.

Un tel énoncé pourrait faire croire à la simplicité du problème. Les lois qui régissent la propagation de la chaleur sont assez complexes et bien que l'on ait réussi à assimiler certains phénomènes thermiques à des phénomènes électriques, les mesures restent extrêmement difficiles à effectuer et le calcul requiert, pour les grosses machines, l'emploi des machines à calculer analogiques.

Les difficultés proviennent de ce que les pertes apparaissent en certains endroits de la machine assez localisés et qu'elles sont évacuées en d'autres endroits. La chaleur doit donc se propager des points d'émission vers les points de refroidissement avant d'être évacuée. Or cette propagation s'effectue à travers des milieux hétérogènes dans lesquels les propriétés thermiques sont très variables. A titre d'exemple, examinons ce qui se passe dans une encoche contenant des conducteurs. La chaleur dégagée par effet Joule dans le cuivre peut se propager vers l'entrefer, vers la culasse et vers les encoches voisines. Le flux de chaleur doit traverser successivement :

— les *isolants* qui jouent le rôle de barrière ou d'isolant thermique ;

— le *fer* qui s'échauffe également sous l'effet de ses propres pertes.

Inversement, la chaleur produite dans le fer peut avoir tendance à se propager vers le cuivre à travers les isolants.

D'une manière générale, les isolants s'opposent à la propagation de la chaleur et on arrive à cette constatation assez paradoxale : pour augmenter la sécurité d'exploitation de la machine, on serait tenté de renforcer l'épaisseur des isolants, mais, dans ces conditions, la gêne apportée au refroidissement provoquerait, pour une même puissance, une augmentation de la température et une réduction de la durée de vie des isolants En voulant protéger les isolants contre un claquage diélectrique, on risque de les détruire par un échauffement accru.

1.62. — LOIS D'ÉCHAUFFEMENT ET DE REFROIDISSEMENT

1.621. Considérations générales.

Supposons un corps homogène, de masse m et de chaleur spécifique c, qui reçoit une quantité de chaleur Q ; sa température s'établit à une valeur :

$$\theta = \frac{Q}{mc}$$

Si le corps est hétérogène, comme par exemple une machine électrique, il faut faire intervenir les différents matériaux avec leur masse propre et leur chaleur spécifique propre ; la formule devient :

$$\theta = \frac{Q}{\Sigma\, mc}$$

Mais cette température n'est pas atteinte instantanément ; si le dégagement de chaleur est localisé, l'égalisation de température va se faire par conductivité à travers les zones de contact, éventuellement par rayonnement et par convection. Il en résulte que la température peut ne pas être uniforme dans toute la masse des différents corps et l'on est amené à considérer un gradient de température, homologue, dans les grandeurs électriques, à un gradient de potentiel par exemple. Il est évident que, dans une machine, c'est la température atteinte dans les points chauds qu'il faut considérer et non pas la valeur moyenne définie par la relation Q/mc. On peut encore dire que l'on a le plus grand intérêt à éviter l'apparition des points chauds.

Nous aurons également à considérer la quantité de chaleur par unité de temps, homologue à une puissance, et qui définit le débit de chaleur, ou puissance thermique, ou flux de chaleur : $\Phi = \frac{Q}{t}$

La relation $\theta = Q\Sigma mc$, nous indique qu'un corps pourra emmagasiner une quantité de chaleur d'autant plus grande que sa masse sera plus élevée et que sa chaleur spécifique sera plus grande. L'expression Σmc détermine la capacité thermique du corps ou de la machine.

1.622. Influence du temps sur l'échauffement et le refroidissement.

Lorsqu'il y a échange de chaleur avec le milieu ambiant et production continue de chaleur à l'intérieur de la machine, la température d'équilibre n'est pas atteinte immédiatement.

Pendant un temps *dt*, la quantité de chaleur dégagée est égale à la quantité de chaleur évacuée :

$$hS(\theta - \theta_0)dt$$

et à la quantité de chaleur emmagasinée

$$mcd\theta$$

en appelant :

h le *coefficient d'échange superficiel* ou quantité de chaleur évacuée par unité de surface et par seconde pour une différence de température de 1 °C ;

S la *surface d'échange avec le milieu extérieur* ;

θ la *température de la machine* ;

θ_0 la *température ambiante* ;

$d\theta$ l'*augmentation de température* pendant le temps *dt*. Nous pouvons donc écrire la relation :

$$\Phi dt = hS(\theta - \theta_0)dt + mcd\theta$$

La solution de cette équation différentielle nous donne :

$$\theta - \theta_0 = \frac{\Phi}{hS}\left(1 - e^{-t/\frac{mc}{hS}}\right)$$

$\frac{\Phi}{hS}$ représente la température d'équilibre.

Il faut aussi remarquer que l'expression mc/hS est une grandeur homologue à un temps. Son équation aux dimensions est en effet :

$$mQ\theta^{-1}m^{-1}Q^{-1}L^2t\theta L^{-2}$$

soit, en définitive, *t*.

Elle définit la constante de temps de la machine τ.

La relation, qui se traduit graphiquement par une exponentielle, permet de vérifier ce que l'on sent déjà intuitivement, à savoir :

La vitesse d'échauffement d'une machine varie en fonction de :

- la *puissance à évacuer* (terme Φ) ;
- la *facilité* avec laquelle ces pertes passent dans le milieu ambiant (terme *h*) ;
- la *surface d'échange* (terme S) ;
- la *masse de la machine* (terme m) ;
- la *chaleur spécifique des matériaux* (terme c).

Il n'est pas sans intérêt de rapprocher cette formule de celle régissant l'établissement du courant dans un circuit inductif :

$$i = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-t/\frac{L}{R}}\right)$$

Le refroidissement obéit à la même loi, mais la constante de temps est plus élevée à cause de l'absence de ventilation à l'arrêt :

$$\theta = \frac{\Phi}{hS} e^{-t/\tau'} \qquad \text{avec} \qquad \tau' > \tau \quad (1)$$

1.623. Capacité de surcharge d'une machine.

Une conséquence très importante résulte des lois d'échauffement et de refroidissement. Tant qu'une machine n'a pas atteint sa température d'équilibre, on peut la surcharger. Nous allons déterminer le temps pendant lequel on peut lui appliquer une surcharge donnée, pour atteindre sa température d'équilibre définie par le constructeur.

◆ **Temps de surcharge admissible :**

Soient :

Φ_0 le *flux thermique* de la machine à l'instant où l'on applique la surcharge ; ce flux étant inférieur au flux nominal Φ_n ;

$k\Phi_n$, le *nouveau flux* résultant de la surcharge ;

t, le *temps* pendant lequel on peut appliquer cette surcharge.

Le calcul donne le résultat suivant :

$$t = \log_e \frac{k - \frac{\Phi_0}{\Phi_n}}{k - 1}$$

Dans le cas particulier où l'on part de l'état froid, c'est-à-dire lorsque $\Phi_0 = 0$, l'on obtient :

$$t = \log_e \frac{k}{k - 1}$$

Ainsi, par exemple, une machine dont la constante de temps est de 1 heure, pourra à partir de l'état froid, être surchargée de façon que ses pertes soient doublées, pendant un temps égal à :

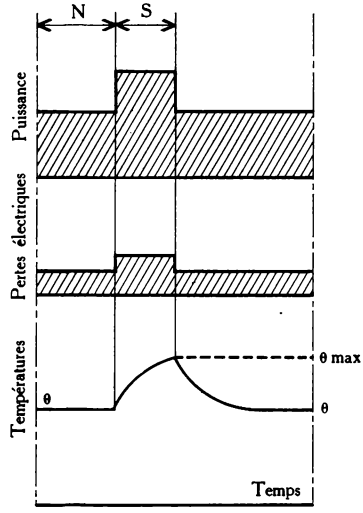
$$t = 1 \times 2{,}3 \log \frac{2}{2 - 1}$$

soit environ 40 mn.

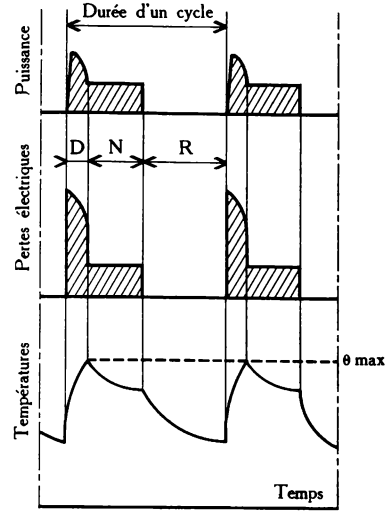
◆ **Puissance thermique équivalente.**

Lorsqu'une machine électrique travaille à une puissance non constante, il est possible de la surcharger, après une période de travail à une puissance inférieure à sa puissance nominale. La seule condition à respecter est de ne jamais dépasser la température maximale admise par le constructeur. En règle très générale,

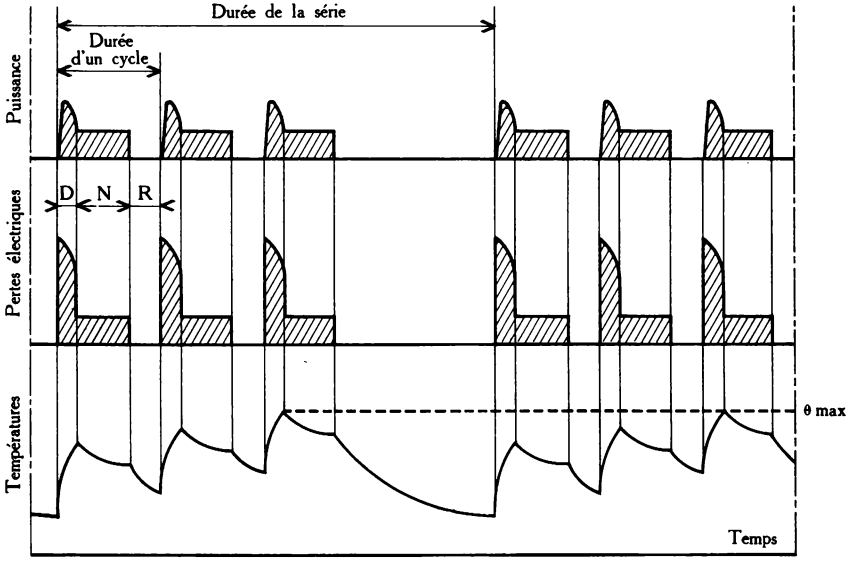
(1) Toutes les considérations sont également valables pour une machine statique, à cette différence près que la constante de temps de refroidissement τ' est sensiblement égale à la constante de temps d'échauffement τ.



Service à surcharges (SS)



Service à démarrages (SD)



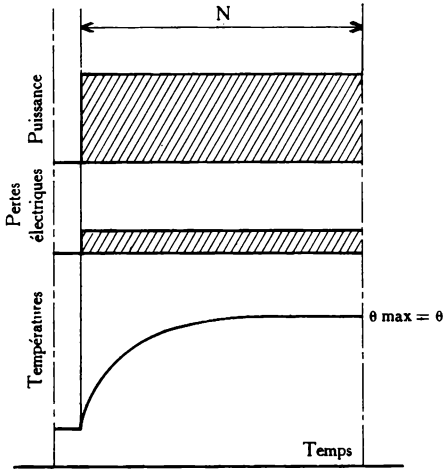
Service à cycles de démarrages (SCD)

LÉGENDE

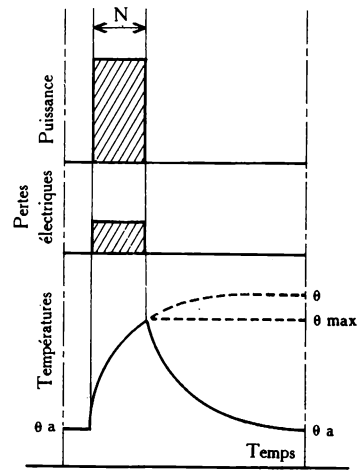
N	Fonctionnement au régime nominal.	**R**	Repos.
S	Fonctionnement en surcharge.	**θ**	Température en service continu.
D	Démarrage.	θ_{max}	Limite de la température maximum.

Fig. 82 *bis.* — Extrait de la norme C 51-100.

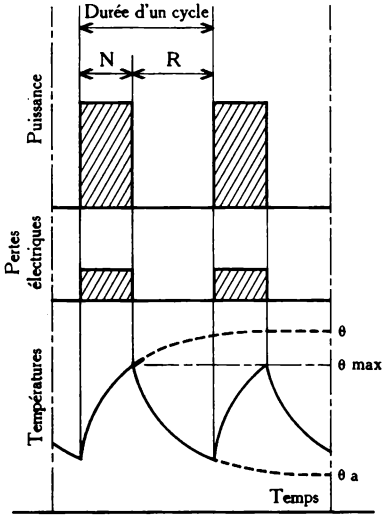
SCHÉMAS REPRÉSENTATIFS DES SERVICES-TYPES



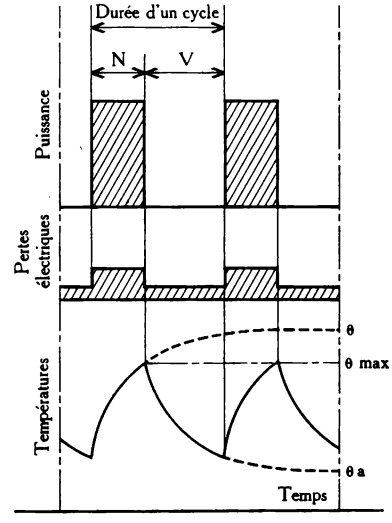
Service continu (SC)



Service temporaire (ST)



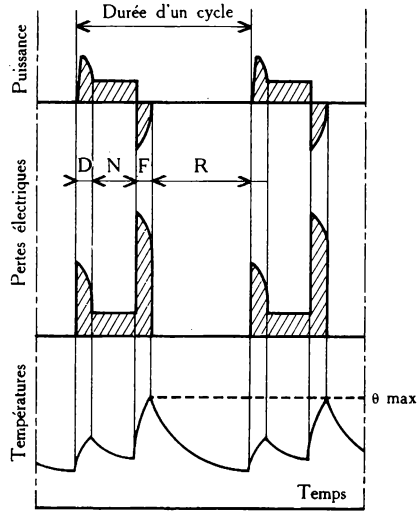
Service intermittent périodique (SI)



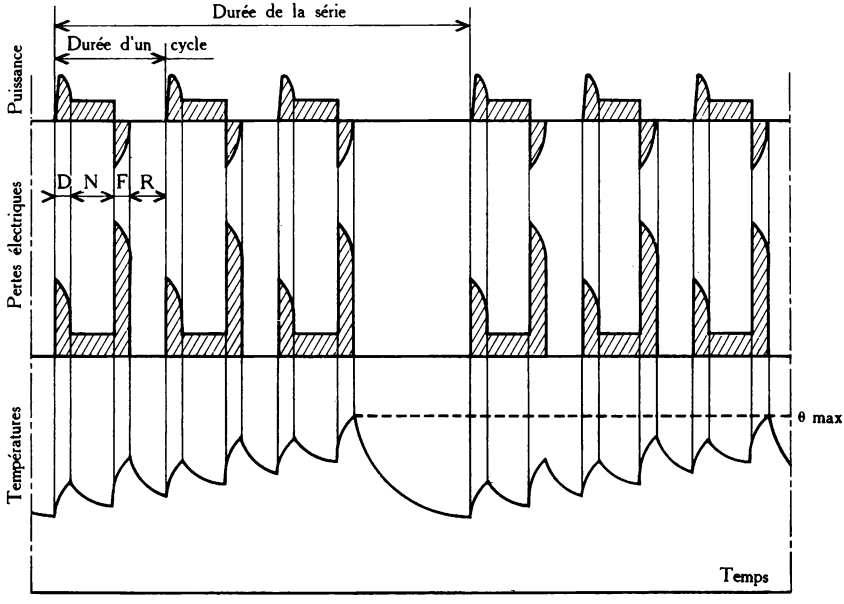
Service ininterrompu à charge intermittente (SCI)

LÉGENDE

N	Fonctionnement au régime nominal.	θ	Température en service continu.
R	Repos.	θ_{max}	Limite de la température maximum.
V	Fonctionnement à vide.	θ_a	Température du milieu refroidissant.



Service à démarrages et freinages (SDF)



Service à cycles de démarrages et de freinages (SCDF)

N. Fonctionnement au régime nominal.
D. Démarrage.
F. Freinage électrique.
R. Repos.
θ_{max} Limite de la température maximum.

on peut dire que la surcharge dépend de la capacité thermique de la machine, de sa constante de temps et du régime auquel elle vient de fonctionner. On peut alors définir une *puissance thermique équivalente* qui est égale à la puissance constante en service continu qui conduirait au même échauffement que celui effectivement atteint dans le fonctionnement à régime variable.

En appelant P_1, la puissance instantanée, la puissance thermique équivalente a sensiblement pour valeur :

$$P_{th} = \left[\frac{\int P_1^2 \, dt}{T}\right]^{1/2}$$

Dans la pratique, les calculs rigoureux font intervenir les temps de démarrage, les temps de freinage et les temps d'arrêt avec des coefficients différents afin de tenir compte des conditions différentes de refroidissement.

Cette propriété permet de choisir des machines ayant une puissance nominale inférieure à la puissance maximale qui leur est demandée pendant un cycle de fonctionnement.

1-63. — DIFFERENTS SERVICES DE FONCTIONNEMENT

Un certain nombre de régimes de fonctionnement ont été définis et codifiés par l'U.T.E. (Norme C 01-010). (*fig.* 82 *bis*).

— **Service temporaire** : service à régime constant pendant un temps déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique en service permanent à ce régime, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir l'égalité de température avec celle du milieu refroidissant.

En général, les constructeurs prévoient des durées de fonctionnement de 30, 60, 90, 120, 180 mn ; mais il est possible de prévoir les machines pour d'autres services.

— **Service temporaire variable** : service à régime variable pendant un temps déterminé, suivi d'un repos suffisant pour rétablir l'égalité de température avec le milieu refroidissant.

— **Service intermittent** : suite de fonctionnements à régime constant séparés des intervalles de repos, les temps de fonctionnement et les temps de repos étant insuffisants pour atteindre l'équilibre thermique, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

— **Service intermittent variable** : suite de fonctionnements à régime variable séparés par des intervalles de repos, les temps de fonctionnement et les temps de repos étant insuffisants pour atteindre l'équilibre thermique, aussi bien pendant les périodes de fonctionnement que pendant les périodes de refroidissement.

— **Service périodique** : service à régime variable se reproduisant périodiquement.

— **Service intermittent périodique** : suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à un régime constant et un temps de repos, ces temps étant insuffisants pour atteindre l'équilibre thermique aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

— **Service ininterrompu à charge intermittente :** suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants pour atteindre l'équilibre thermique, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

— **Facteur de marche** (service intermittent périodique ou ininterrompu à charge intermittente). Rapport de la durée de la période de fonctionnement en charge à la durée du cycle ; il est compris entre 0 et 1 et peut également s'exprimer en pour cent.

1.64. — SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT

La chaleur apparaissant à l'intérieur de la machine est évacuée vers le milieu ambiant par les phénomènes suivants :

— *conductivité* de l'intérieur des conducteurs et des tôles vers les surfaces extérieures ;

— *rayonnement* et *convection naturels* ;

— *convection forcée* provoquée par la ventilation.

En ce qui concerne le refroidissement par rayonnement et convection, il est déjà bon de remarquer que les pertes évacuées sont proportionnelles à la surface en contact avec le milieu ambiant. La puissance que l'on peut admettre dans un circuit magnétique est proportionnelle au volume de ce circuit. Le rapport de la surface de refroidissement au volume diminue lorsque les dimensions linéaires de la machine augmentent et on comprend alors tout l'intérêt qu'il faut accorder à la ventilation, puisque c'est par elle qu'est évacuée la plus grande partie des pertes dans les grandes machines.

Actuellement trois techniques de refroidissement diffèrent par la nature du fluide de refroidissement : air, hydrogène, liquide (1).

1.641. Refroidissement par air.

Cette technique s'applique à toutes les machines, à l'exception des grandes turbo-machines.

◆ **Petites machines.** Le refroidissement n'est, en général, pas critique et ne fait donc pas l'objet de recherches poussées. On peut distinguer deux types de machines :

— *Machines ouvertes.* L'air aspiré par un ventilateur est refoulé à l'intérieur du moteur où il vient lécher la partie extérieure de la tôlerie, l'entrefer et les têtes de bobines avant de ressortir à l'autre extrémité de la machine.

---

(1) Consulter également la norme C 51-100. Articles 30, 31, 32.

— *Machines fermées.* L'air extérieur n'est plus en contact avec l'intérieur de la machine. Toute la chaleur doit d'abord se propager par conductivité à travers le circuit magnétique et la carcasse ; de là elle est évacuée par convection forcée dans le milieu ambiant. L'égalisation de la température interne est facilitée par des ventilateurs intérieurs. La présence d'ailettes sur les flasques et sur la carcasse facilite le refroidissement extérieur.

◆ **Machines de moyenne et grande puissance.**

Le refroidissement des machines ouvertes ne présente pas de difficultés. Avec des évents et un débit d'air suffisant on arrive facilement à évacuer la chaleur. Tout au plus, lorsque la vitesse périphérique est très faible, il faut prévoir un ventilateur auxiliaire entraîné par un moteur séparé.

La réalisation de machines fermées est plus difficile. Il est possible d'ajoindre à une machine ouverte des buses munies de filtres et raccordées à une canalisation d'air ; l'air est généralement puisé et rejeté à l'extérieur de la salle où se tient la machine (*fig.* 83). Une autre solution consiste à munir la machine d'un échangeur de chaleur indépendant, par exemple un réfrigérant à tubes d'eau munis d'ailettes. C'est de cette façon que sont refroidis les grands alternateurs hydrauliques, les réfrigérants étant généralement installés à l'intérieur même de la machine, sur les côtés ou dans une fosse.

Une solution valable jusqu'à quelques milliers de kilovolts-ampères utilise le refroidissement de l'air intérieur par contact avec l'air extérieur au travers de tubes disposés à la périphérie de la carcasse (*fig.* 84).

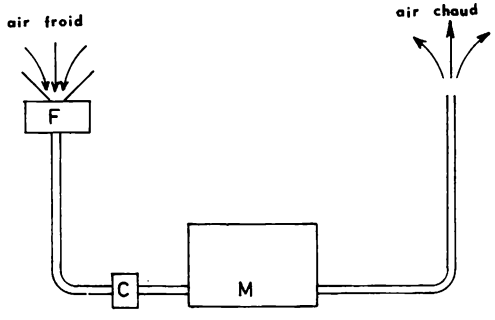


Fig. 83.

F. Filtre.
C. Compresseur.
M. Moteur.

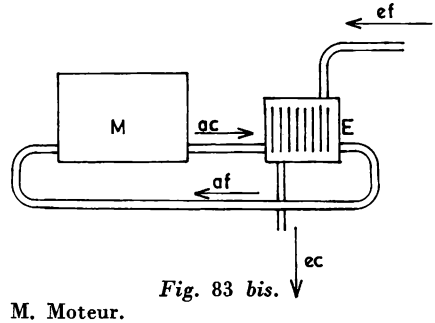


Fig. 83 *bis.*

M. Moteur.
E. Echangeur de chaleur.
ef. Eau froide
ec. Eau chaude.
af. Air froid.
ac. Air chaud.

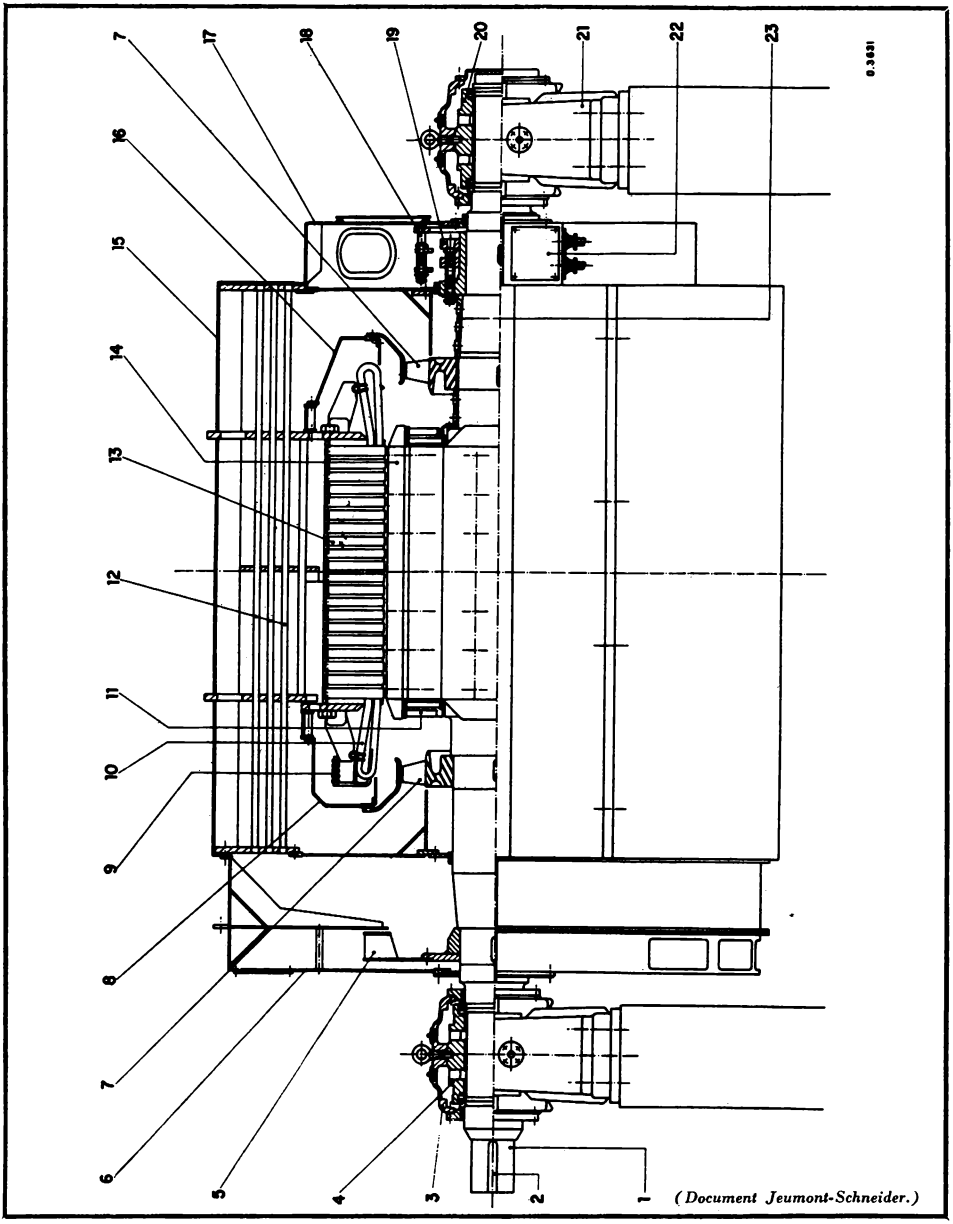


Fig. 84. — Le système de refroidissement comprend :
le ventilateur d'air extérieur 5 ; la grille de protection extérieure 6 ; le ventilateur intérieur 7 ; le flasque guide d'air 8 ; le faisceau tubulaire 12 ; le flasque guide d'air 16.

1.642. Refroidissement par hydrogène.

L'accroissement de la puissance spécifique des turbo-alternateurs entraîne une augmentation des pertes par unité de surface. Alors que dans un alternateur hydraulique, la puissance à évacuer est de l'ordre de 0,6 à 0,7 W/cm², elle atteint et dépasse 4 W/cm² sur les grands turbo-alternateurs. La puissance dissipée par rayonnement et convection naturels est de l'ordre de 0,1 W/cm² pour un échauffement de 80 °C, ce qui est négligeable par rapport à la puissance à évacuer.

La capacité thermique volumique ou quantité de chaleur que peut emmagasiner un gaz par unité de volume est la même pour tous les gaz. Il faut donc assurer le même débit quel que soit le gaz employé. En première approximation, la puissance nécessaire au ventilateur pour mettre en mouvement un certain volume de gaz dépend de la masse de ce gaz, d'où l'intérêt d'un gaz à masse spécifique faible.

En bref, l'hydrogène présente par rapport à l'air plusieurs avantages plus ou moins marqués :

— *coefficient d'échange superficiel* plus élevé de 50 % ;

— *viscosité plus faible* d'environ moitié ;

— *masse volumique très faible*, 0,0896 kg/m³ contre 1,29 kg/m³ pour l'air ;

— *conductivité thermique plus élevée* : 0,0167 W.cm/°C contre 0,000236 W.cm/°C pour l'air ; de plus, la conductivité de l'hydrogène est comparable à celle des isolants (environ 0,002 W.cm/°C) ce qui limite les inconvénients résultant d'un jeu entre les isolants et le fer ;

— *oxydation des isolants supprimée* ;

— *bruit fortement atténué* ;

— *augmentation possible* de la pression de l'hydrogène sans que cela entraîne des pertes mécaniques exagérées. Le coefficient d'échange superficiel étant proportionnel à l'exposant 0,8 de la pression et le volume de gaz entraîné par unité de temps augmentant dans le même sens que la pression, une augmentation de la puissance demandée à la machine sst possible par une simple augmentation de la pression d'hydrogène.

En définitive, les pertes mécaniques dues à la ventilation pour une même éfficacité sont environ le dixième de celles provoquées par l'air.

En regard de tous ces avantages, l'hydrogène présente l'inconvénient d'un danger d'explosion lorsque sa teneur dans l'air est comprise entre 9 et 70 %, ce qui oblige à certaines sujétions du point de vue constructif.

Pour éviter ce danger, il suffit évidemment d'empêcher les rentrées d'air à l'intérieur de la machine ; ce résultat est obtenu par une légère surpression permanente de l'hydrogène par rapport à la pression atmosphérique. Mais cette surpression risque d'entraîner des fuites d'hydrogène à l'extérieur de la machine, d'où la nécessité d'avoir une étanchéité absolue.

L'étanchéité aux paliers est obtenue par un joint d'huile sous une pression supérieure à celle qui règne à l'intérieur de la machine *(fig. 84 bis)*. L'huile ayant absorbé d'un côté du joint de l'hydrogène et de l'autre côté de l'air est séparée en deux flux et dégazée dans un épurateur.

Les installations récentes fonctionnent sans dégazeur et l'air pénétrant avec l'huile du côté de l'hydrogène est chassé dans l'atmosphère par un courant d'hydrogène prélevé à l'intérieur de la machine (*fig.* 85).

1.643. Organisation générale d'un système de refroidissement.

Une installation comprend :

— une *source d'hydrogène* constituée par des bouteilles placées à l'extérieur de la machine ;

— un *système interne de ventilation* ;

— des *réfrigérants à tube d'eau* munis d'ailettes et placés généralement à l'intérieur de la machine ;

— un *dispositif d'étanchéité* aux paliers ;

— éventuellement une *station d'épurage* de l'huile ;

— un *tableau de contrôle* groupant les appareils de mesure : pression, température, pression d'huile (*fig.* 86)...

Parmi tous ces organes, nous examinerons sommairement le dispositif de ventilation.

Suivant la façon dont l'hydrogène refroidit les conducteurs, on distingue :

— les *machines à refroidissement indirect* ;

— les *machines à refroidissement direct.*

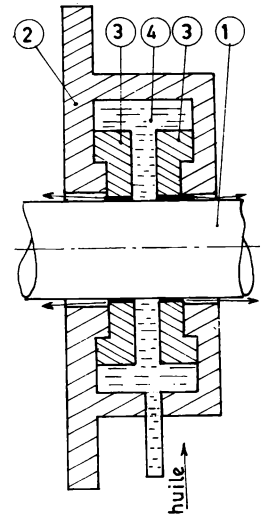


Fig. 84 *bis.*
1. Arbre.
2. Anneau.
3. Bagues en segments maintenues par ressorts.
4. Huile.

◆ **Refroidissement indirect.**

C'est le procédé qui a été adopté sur les turbo-alternateurs de 125 MW et les machines de puissance inférieure. Il ne diffère en rien des procédés conventionnels de refroidissement employés sur les machines fermées à réfrigérants.

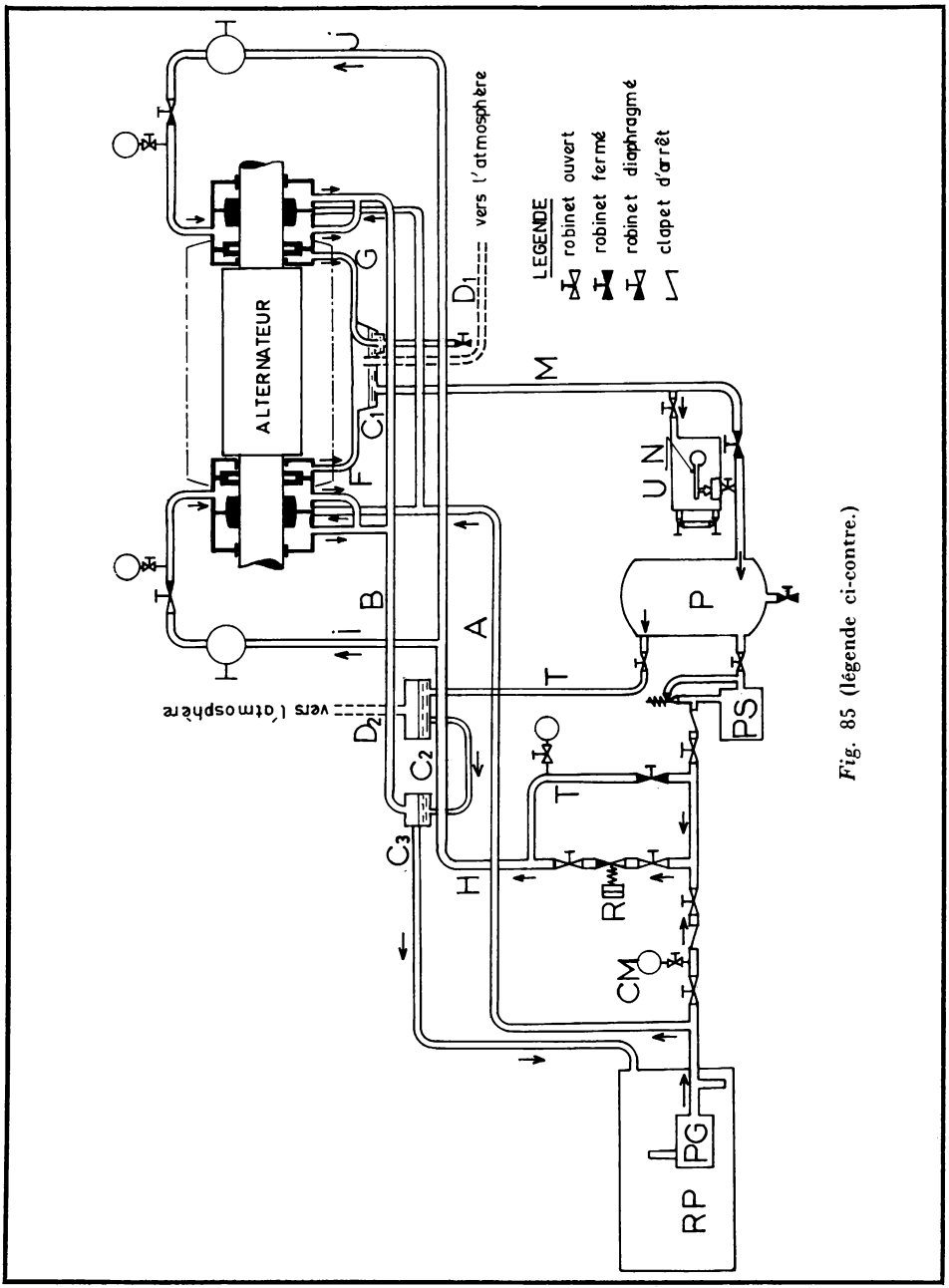


Fig. 85 (légende ci-contre.)

La chaleur se propage d'abord par conductibilité thermique jusqu'aux surfaces des circuits magnétiques, et, de là, est enlevée par le courant d'hydrogène.

— *Refroidissement du stator.*

Le stator est divisé en compartiments ; les uns sont destinés à recevoir l'hydrogène refroidi, les autres reçoivent l'hydrogène réchauffé qui est ensuite dirigé sur les réfrigérants. L'hydrogène se trouve en contact avec les tôles du côté de l'entrefer, du côté de la culasse, et à l'intérieur des évents radiaux. Il vient également lécher les parties frontales des enroulements (*fig.* 87).

— *Refroidissement du rotor.*

L'hydrogène est aspiré à travers des rainures prévues entre les encoches des conducteurs et ressort dans l'entrefer à travers des trous pratiqués dans les cales de fermeture des rainures, ou traverse les rainures dans toute la longueur du rotor. Suivant le principe adopté, l'hydrogène est admis d'un seul côté ou des deux côtés du rotor (*fig.* 88).

◆ **Refroidissement direct.**

La transmission de la chaleur par conductibilité à travers le fer et les isolants entraîne des variations de température assez importantes entre la source de chaleur et la zone où cette chaleur est évacuée par la ventilation.

La *figure* 89 indique la distribution des températures dans une encoche de rotor d'une machine à refroidissement indirect.

Fig. 85.

Analyse du fonctionnement : l'huile sous pression est fournie par la pompe PG et amenée sur les coussinets par la canalisation A. Elle est amenée aux joints par les canalisations H, I, J.

L'huile ayant traversé le joint côté air est recueillie avec l'huile de graissage dans la canalisation B et retourne au réservoir à travers le collecteur C_3.

L'huile côté hydrogène est recueillie par les canalisations F, G, le collecteur C_1, la conduite M, le robinet à flotteur N, le réservoir de secours P, la conduite T, les collecteurs C_2 et C_3 et retourne au réservoir de graissage.

Lors du passage dans le joint côté hydrogène, l'huile libère de l'air et absorbe de l'hydrogène. L'air libéré dans le joint est balayé par l'hydrogène en surpression et entraîné dans l'atmosphère à travers F_1 G_1 C_1 D_1. Un robinet sur D_1 permet de doser le débit d'hydrogène nécessaire pour obtenir un balayage convenable.

L'hydrogène absorbé par l'huile est libéré à l'air libre par la conduite D_2.

Une installation de secours est constituée par la pompe PS mise en route par le contacteur manométrique CM ; l'huile aspirée dans le réservoir P est refoulée dans la canalisation H à travers le régulateur de pression R.

En cas de panne du régulateur, la pression est réglée manuellement à travers le by-pass T.

Si la pression d'hydrogène devient supérieure à celle de la colonne d'huile dans M, il y a risque de fuite d'hydrogène à travers P et D_2. Dans ces conditions, le robinet à flotteur N se ferme lorsque le niveau d'huile baisse au-dessous d'une certaine valeur.

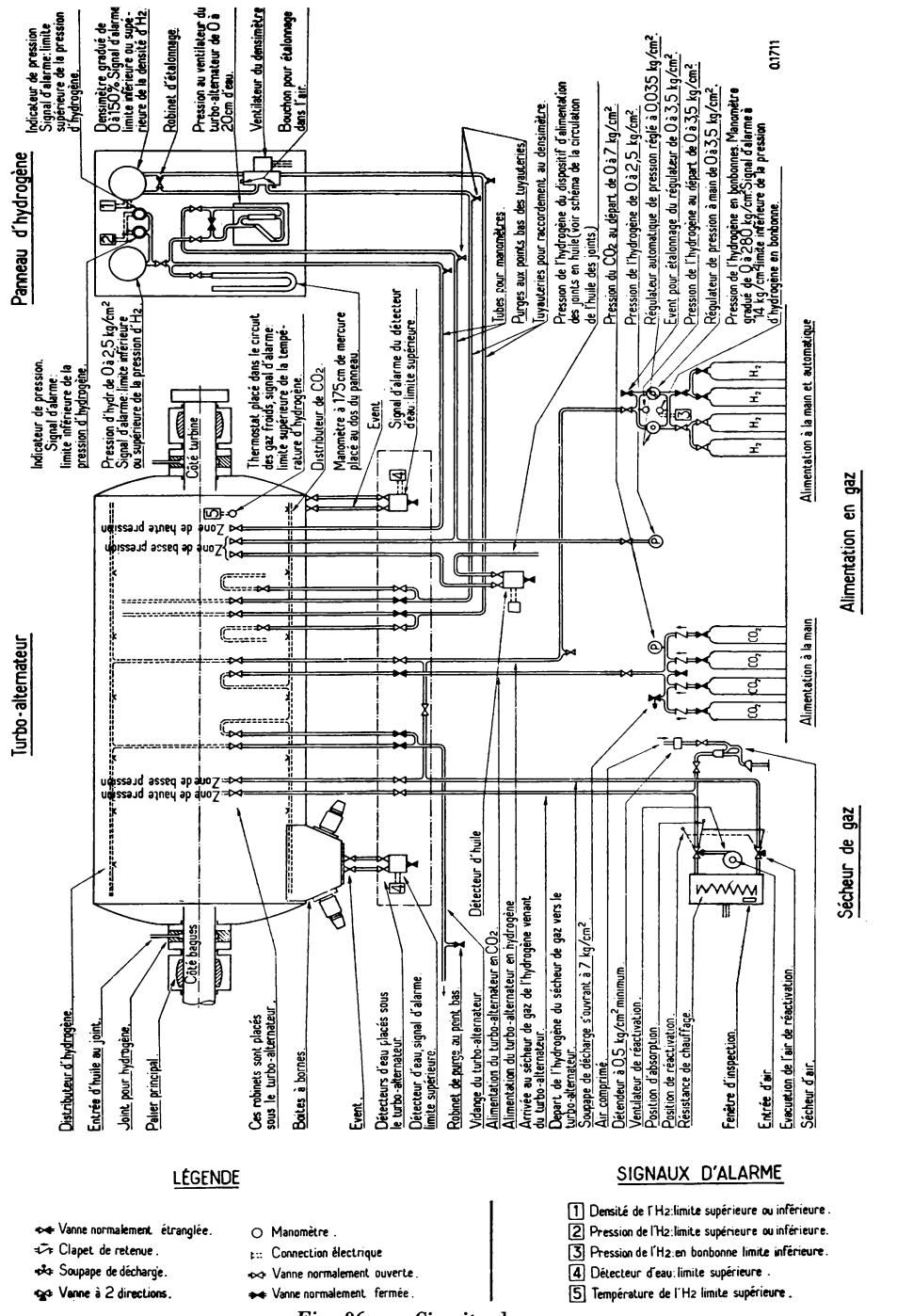
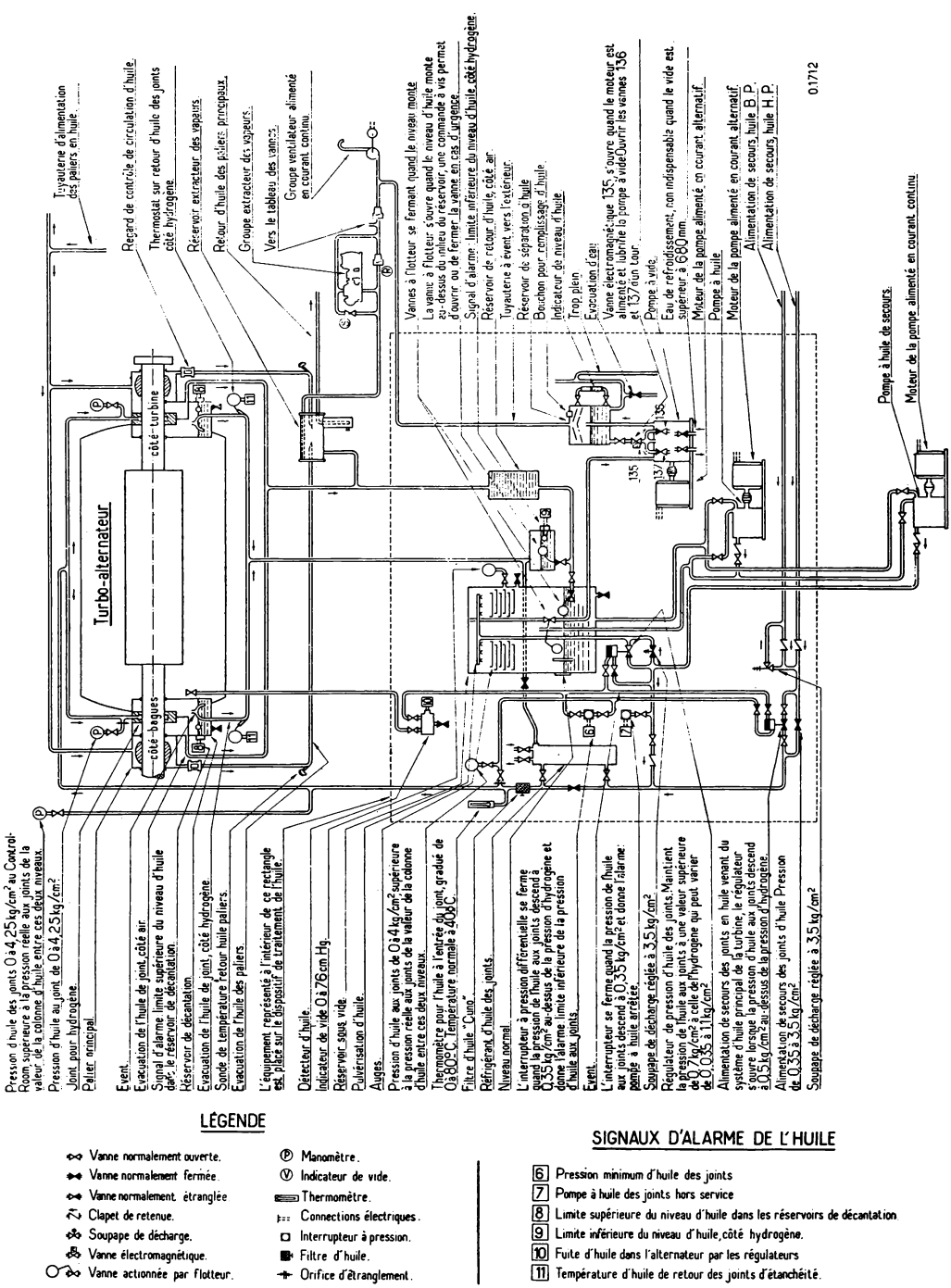

Panneau d'hydrogène
Turbo-alternateur
Alimentation en gaz
Sécheur de gaz
Densimètre gradué de 0 à 150% Signal d'alarme limite inférieure ou supérieure de la densité d'H2.
Robinet d'étalonnage.
Pression au ventilateur du turbo-alternateur de 0 à 20cm d'eau.
Ventilateur du densimètre
Bouchon pour étalonnage dans l'air.
Indicateur de pression. Signal d'alarme: limite inférieure de la pression d'hydrogène.
Pression d'hydr de 0 à 2,5 kg/cm² Signal d'alarme: limite inférieure ou supérieure de la pression d'H2.
Côté turbine
Thermostat placé dans le circuit des gaz froids signal d'alarme limite supérieure de la température d'hydrogène.
Distributeur de CO2.
Manomètre à 175cm de mercure placé au dos du panneau.
Event.
Signal d'alarme du détecteur d'eau: limite supérieure
Tubes pour manomètres
Purges aux points bas des tuyauteries
Tuyauteries pour raccordement au densimètre
Pression de l'hydrogène du dispositif d'alimentation des joints en huile (voir schéma de la circulation de l'huile des joints.)
Pression du CO2 au départ de 0 à 7 kg/cm².
Pression de l'hydrogène de 0 à 2,5 kg/cm².
Régulateur automatique de pression réglé à 0,035 kg/cm².
Event pour étalonnage du régulateur de 0 à 3,5 kg/cm².
Pression de l'hydrogène au départ de 0 à 3,5 kg/cm².
Régulateur de pression à main de 0 à 3,5 kg/cm².
Pression de l'hydrogène en bonbonnes. Manomètre gradué de 0 à 220 kg/cm². Signal d'alarme à 14,4 kg/cm² limite inférieure de la pression d'hydrogène en bonbonne.
Q1711
Distributeur d'hydrogène.
Entrée d'huile au joint.
Joint pour hydrogène.
Palier principal.
Côté bagues
Ces robinets sont placés sous le turbo-alternateur.
Boîtes à bornes.
Event.
Détecteurs d'eau placés sous le turbo-alternateur.
Détecteur d'eau signal d'alarme limite supérieure.
Robinet de purge au point bas.
Détecteur d'huile
Vidange du turbo-alternateur.
Alimentation du turbo-alternateur en CO2.
Alimentation du turbo-alternateur en hydrogène.
Arrivée au sécheur de gaz de l'hydrogène venant du turbo-alternateur.
Départ de l'hydrogène du sécheur de gaz vers le turbo-alternateur.
Soupape de décharge s'ouvrant à 7 kg/cm².
Air comprimé.
Détendeur à 0,5 kg/cm² minimum.
Ventilateur de réactivation.
Position d'absorption.
Position de réactivation.
Résistance de chauffage.
Fenêtre d'inspection.
Entrée d'air.
Evacuation de l'air de réactivation.
Sécheur d'air.
Alimentation à la main
Alimentation à la main et automatique
Zone de haute pression
Zone de basse pression
LÉGENDE
Vanne normalement étranglée.
Clapet de retenue.
Soupape de décharge.
Vanne à 2 directions.
Manomètre.
Connection électrique
Vanne normalement ouverte.
Vanne normalement fermée.
SIGNAUX D'ALARME
1 Densité de l'H2: limite supérieure ou inférieure.
2 Pression de l'H2: limite supérieure ou inférieure.
3 Pression de l'H2 en bonbonne limite inférieure.
4 Détecteur d'eau: limite supérieure.
5 Température de l'H2 limite supérieure.

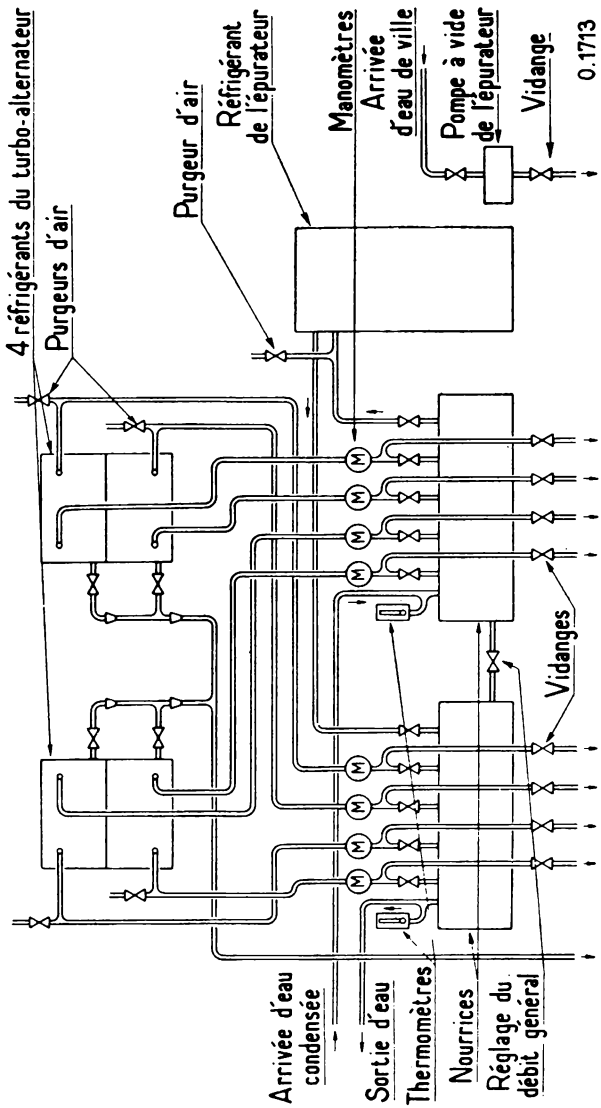
Fig. 86. — Circuits de gaz.

Les documents des *figures* 86 nous ont été aimablement communiqués par la Société Jeumont-Schneider. Les pressions y étant exprimées en kg/cm², nous rappelons que 10 N/cm² = 1 bar (unité SI) ≈ 1 kg/cm².


Turbo-alternateur
côté bagues
côté turbine
Pression d'huile des joints 0 à 4,25 kg/cm² au Control-Room supérieure à la pression réelle aux joints de la valeur de la colonne d'huile entre ces deux niveaux.
Pression d'huile au joint de 0 à 4,25 kg/cm².
Joint pour hydrogène.
Palier principal.
Event.
Evacuation de l'huile de joint, côté air.
Signal d'alarme limite supérieure du niveau d'huile dans le réservoir de décantation.
Réservoir de décantation.
Evacuation de l'huile de joint, côté hydrogène.
Sonde de température retour huile paliers.
Evacuation de l'huile des paliers.
L'équipement représenté à l'intérieur de ce rectangle est placé sur le dispositif de traitement de l'huile.
Détecteur d'huile.
Indicateur de vide 0 à 76 cm Hg.
Réservoir sous vide.
Pulvérisation d'huile.
Jauges.
Pression d'huile aux joints de 0 à 4 kg/cm² supérieure à la pression réelle aux joints de la valeur de la colonne d'huile entre ces deux niveaux.
Thermomètre pour l'huile à l'entrée du joint, gradué de 0 à 80° C, température normale à 40° C.
Filtre d'huile "Cuno".
Réfrigérant d'huile des joints.
Niveau normal.
L'interrupteur à pression différentielle se ferme quand la pression de l'huile aux joints descend à 0,35 kg/cm² au-dessus de la pression d'hydrogène et donne l'alarme limite inférieure de la pression d'huile aux joints.
Event.
L'interrupteur se ferme quand la pression de l'huile aux joints descend à 0,35 kg/cm² et donne l'alarme: pompe à huile arrêtée.
Soupape de décharge réglée à 3,5 kg/cm².
Régulateur de pression d'huile des joints. Maintient la pression de l'huile aux joints à une valeur supérieure de 0,7 kg/cm² à celle de l'hydrogène qui peut varier de 0,035 à 11 kg/cm².
Alimentation de secours des joints en huile venant du système d'huile principal de la turbine, le régulateur s'ouvre lorsque la pression d'huile aux joints descend à 0,35 kg/cm² au-dessus de la pression d'hydrogène.
Alimentation de secours des joints d'huile Pression de 0,35 à 3,5 kg/cm².
Soupape de décharge réglée à 3,5 kg/cm².
Tuyauterie d'alimentation des paliers en huile.
Regard de contrôle de circulation d'huile.
Thermostat sur retour d'huile des joints côté hydrogène.
Réservoir extracteur des vapeurs.
Retour d'huile des paliers principaux.
Groupe extracteur des vapeurs.
Vers le tableau des vannes.
Groupe ventilateur alimenté en courant continu.
Vannes à l'intérieur se fermant quand le niveau monte.
La vanne à flotteur s'ouvre quand le niveau d'huile monte au-dessus du milieu du réservoir, une commande à vis permet d'ouvrir ou de fermer la vanne en cas d'urgence.
Signal d'alarme limite inférieure du niveau d'huile, côté hydrogène.
Réservoir de retour d'huile, côté air.
Tuyauterie à event. vers l'extérieur.
Réservoir de séparation d'huile.
Bouchon pour remplissage d'huile.
Indicateur de niveau d'huile.
Trop plein.
Evacuation d'air.
Vanne électromagnétique 135, s'ouvre quand le moteur est alimenté et lubrifie la pompe à vide. Ouvrir les vannes 136 et 137 d'un tour.
Pompe à vide.
Eau de refroidissement, non indispensable quand le vide est supérieur à 680 mm.
Moteur de la pompe alimenté en courant alternatif.
Pompe à huile.
Moteur de la pompe alimenté en courant alternatif.
Alimentation de secours, huile B.P.
Alimentation de secours, huile H.P.
Pompe à huile de secours.
Moteur de la pompe alimenté en courant continu.
0.1712
LÉGENDE
Vanne normalement ouverte.
Vanne normalement fermée.
Vanne normalement étranglée
Clapet de retenue.
Soupape de décharge.
Vanne électromagnétique.
Vanne actionnée par flotteur.
Manomètre.
Indicateur de vide.
Thermomètre.
Connections électriques.
Interrupteur à pression.
Filtre d'huile.
Orifice d'étranglement.
SIGNAUX D'ALARME DE L'HUILE
6 Pression minimum d'huile des joints
7 Pompe à huile des joints hors service
8 Limite supérieure du niveau d'huile dans les réservoirs de décantation
9 Limite inférieure du niveau d'huile, côté hydrogène.
10 Fuite d'huile dans l'alternateur par les régulateurs
11 Température d'huile de retour des joints d'étanchéité.

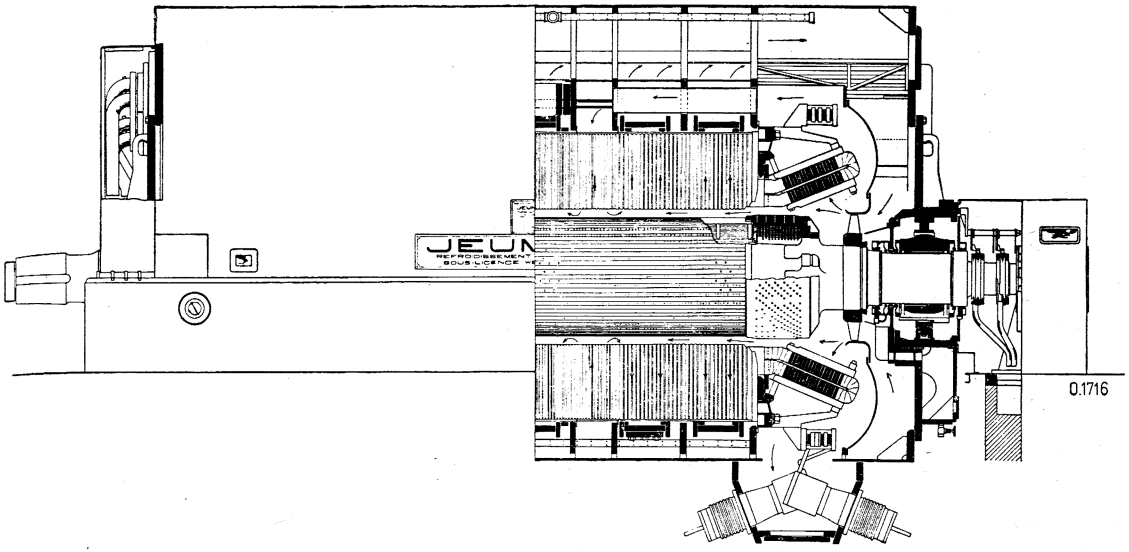
(Documents Jeumont.)

***Fig.* 86. — Circuits d'huile.**



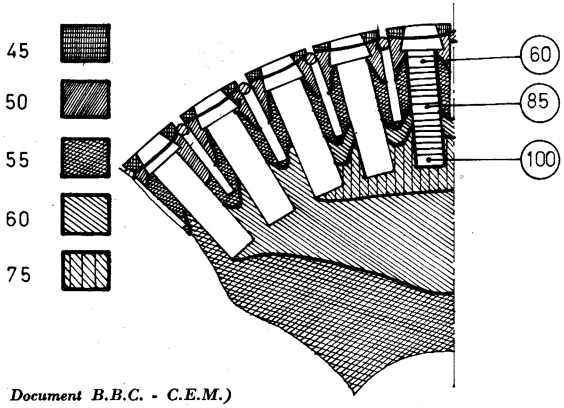
(Document Jeumont.)

Fig. 86. — Circuits d'eau.



(Document Jeumont-Schneider.)

Fig. 87. — Parcours de l'hydrogène dans un stator à refroidissement indirect. Remarquer aussi les trous dans la calotte de frettage du rotor et dans les cales de fermeture du rotor.



Document B.B.C. - C.E.M.)

Fig. 89.

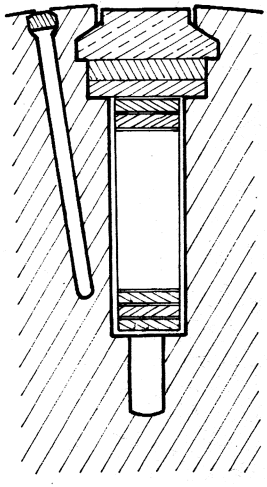


Fig. 88.

Pour éviter ces diverses chutes de température, la technique du refroidissement direct prévoit le passage du fluide réfrigérant directement sur les conducteurs. Le refroidissement direct utilise l'hydrogène pour le refroidissement des rotors et l'hydrogène ou un liquide pour le refroidissement des stators. Certaines machines sont également prévues avec un refroidissement direct sur une partie et refroidissement indirect sur l'autre.

— *Refroidissement du rotor.* Le procédé le plus simple consiste à disposer des conducteurs pleins dans les encoches, de telle façon qu'il subsiste un canal dans l'encoche. Des trous percés dans les cales de fermeture laissent passer l'hydrogène dans l'entrefer (*fig.* 90).

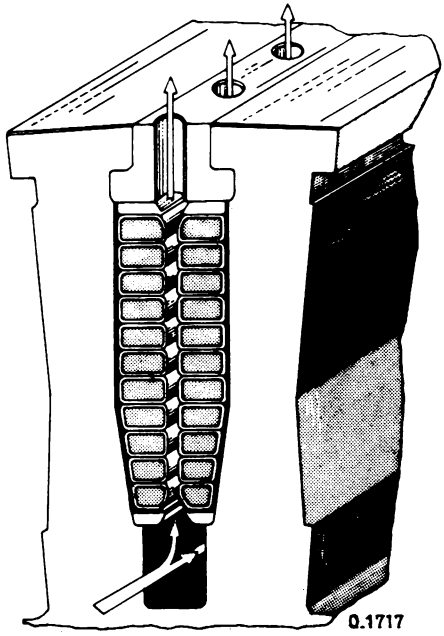


Fig. 90. *(Document Jeumont.)*

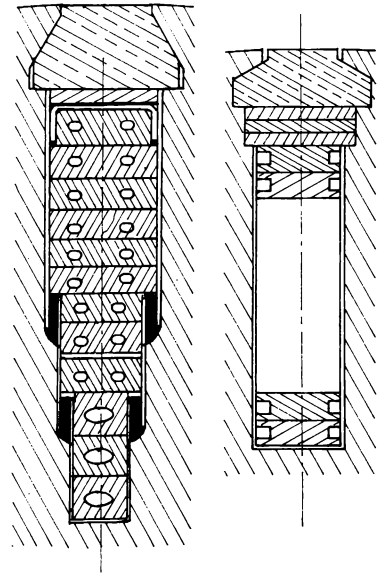


Fig. 91.

Il est également possible de prévoir des conducteurs creux, suivant la disposition de la *figure* 91.

— *Refroidissement du stator.* En fait, il y a deux refroidissements distincts : celui des tôles et celui des conducteurs.

Le refroidissement des tôles est obtenu par passage de l'hydrogène à l'intérieur de canaux ménagés dans les tôles.

Le refroidissement des conducteurs s'opère comme pour les conducteurs du rotor.

Le passage de l'hydrogène peut s'effectuer de bout en bout sur toute la longueur de la machine, ou, au contraire, à partir de chacune des extrémités, pour être évacué à travers des évents et des compartiments disposés dans le stator.

◆ **Refroidissement par liquide.**

Il s'agit, en fait, d'un système de refroidissement direct dans lequel on utilise un liquide. Aujourd'hui, cette technique est utilisée par certains constructeurs sur les alternateurs de 250 MW et c'est la seule qui permettra d'accéder à la puissance de 600 MW en conservant les dimensions actuelles des alternateurs de 250 MW.

Les liquides employés sont de l'huile à faible viscosité ou de l'eau distillée.

L'intérêt du refroidissement par liquide apparaît lorsqu'on compare ses possibilités par rapport à l'hydrogène : en conservant dans les deux cas les vitesses normales d'écoulement, il est possible d'évacuer, pour le même échauffement, 15 fois plus de pertes avec l'huile et 40 fois plus avec l'eau. Il est évidemment possible d'évacuer des pertes moindres avec des échauffements réduits. C'est ainsi que dans les turbo-alternateurs de 250 MW, l'échauffement du cuivre en son point le plus chaud est de 20 °C par rapport à l'eau, alors que le rotor à refroidissement direct par hydrogène présente des différences de température de 40 °C entre hydrogène et cuivre.

Le refroidissement par liquide s'applique au cuivre et au fer.

Le refroidissement du fer s'opère comme avec l'hydrogène par passage dans des canaux à travers les tôles. Les évents radiaux devenus inutiles sont supprimés.

La *figure* 92 indique la coupe d'une barre Roebel dans laquelle certains conducteurs permutés sont creux et parcourus par le liquide. L'alimentation et l'évacuation se font aux extrémités des barres par des raccords les reliant à des collecteurs circulaires (*fig.* 92 *bis*).

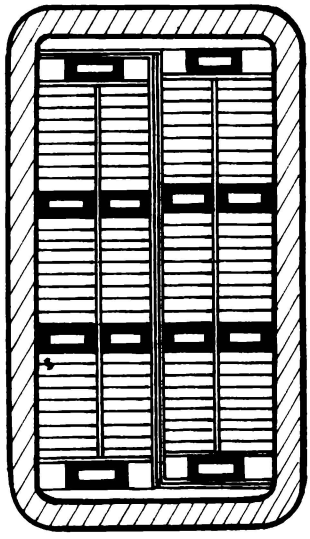
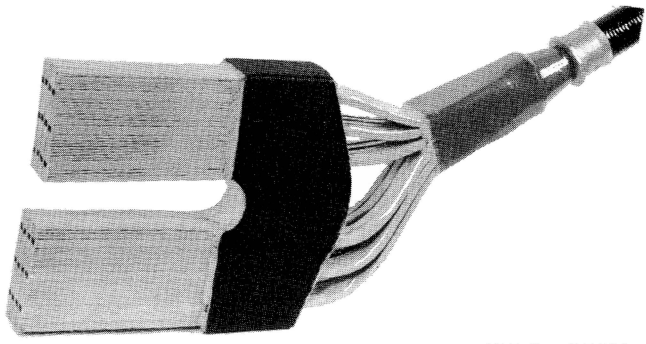


Fig. 92.



(B.B.C. - C.E.M.)

Fig. 92 *bis.* — Arrivées ou départs de l'huile circulant dans les barres Rœbel.

La mise en route du liquide est assurée par une pompe dont la puissance est de l'ordre de 10 kW sur une machine de 250 MW. Le refroidissement du liquide est effectué, comme pour l'hydrogène, dans des réfrigérants.

Le refroidissement direct peut mettre en œuvre deux fluides différents : gaz pour les tôles et liquide pour les barres. Indiquons encore que certains constructeurs prévoient une étanchéité complète entre le rotor et le stator ; celle-ci est obtenue à l'aide d'un cylindre isolant dans l'entrefer.

1.7. — MACHINES DE CONSTRUCTION SPÉCIALE

1.71. — ALTERNATEURS POUR FRÉQUENCES ÉLEVÉES

Il est nécessaire, pour certaines applications, de disposer de courants alternatifs à des fréquences supérieures à la fréquence industrielle normalisée (1).

L'utilisation d'alternateurs classiques conduit à augmenter le nombre de pôles et la vitesse de rotation. Pour des fréquences élevées, il n'est plus possible de concevoir et de réaliser les enroulements, par suite de la diminution du pas polaire. Soient, en effet, :

p, le *nombre de paires de pôles ;*

n, la *vitesse en tours par seconde ;*

D, le *diamètre du rotor.*

La vitesse périphérique du rotor a pour valeur :

$$v = \pi D n \qquad (1)$$

Elle est limitée, à cause des efforts engendrés par la force centrifuge, à une valeur inférieure à 180 m/s.

Dans l'expression (1) on peut remplacer n par sa valeur, exprimée en fonction de f et de p, soit $n = \frac{f}{p}$

$$v = \pi D \frac{f}{p} \qquad (2)$$

Le pas polaire, mesuré à la périphérie du rotor, a pour valeur :

$\frac{\pi D}{2p}$, soit en remplaçant πD par sa valeur, tirée de l'expression (2).

$$\frac{vp}{2pf} = \frac{v}{2f}$$

Si on voulait obtenir une fréquence de 10 000 Hz, le pas aurait pour valeur :

$$\frac{180}{2 \times 10\,000} = 0{,}009\text{m}, \qquad \text{soit} \qquad 9 \text{ mm}$$

La fréquence est limitée, dans les alternateurs de construction classique, à une valeur de l'ordre de 800 Hz, ce qui entraîne un pas polaire d'environ 10 cm.

Pour obtenir des fréquences supérieures, on a recours à d'autres modes de construction. Le rotor ne porte pas d'enroulement ; il se présente sous la forme

(1) Voir, notamment, tome 4, les applications relatives au chauffage par induction.

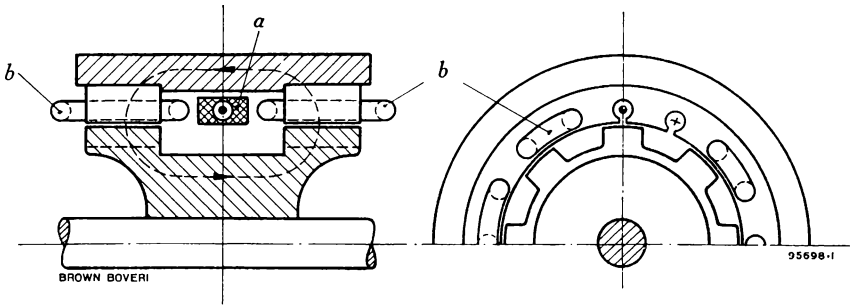


Fig. 93. — Croquis schématique d'une machine homopolaire.

a = enroulement inducteur ;

b = enroulement induit.

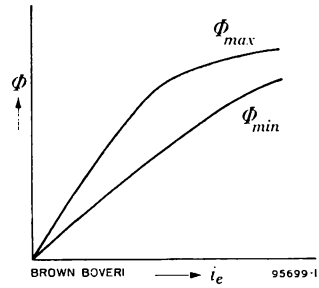


Fig. 94. — Courbes d'aimantation d'une machine à modulation.

Φ = flux correspondant à un pas polaire ;

i_e = courant d'excitation.

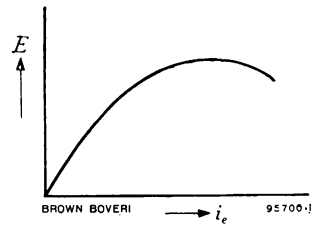


Fig. 94 *bis.* — Tension à vide E de la machine à modulation en fonction du courant d'excitation i_e.

d'une roue dentée. L'enroulement d'excitation et l'enroulement induit sont logés dans le stator. Sous l'effet de la rotation du rotor, il se produit, en chaque point de l'entrefer, une variation de réluctance au moment du passage des dents du rotor. Il en résulte une pulsation du flux qui passe dans les bobines de l'enroulement induit et l'apparition d'une force électromotrice induite alternative dont la fréquence correspond à celle de la pulsation.

Trois types principaux dérivent de ce principe de construction :

— *alternateur homopolaire* ;
— *alternateur hétéropolaire* du type Lorentz-Schmidt ;
— *alternateur hétéropolaire* du type Guy.

1.711. Alternateur homopolaire.

La disposition des enroulements et des circuits est indiquée sur la *figure* 93. La bobine inductrice, ayant la forme d'un anneau concentrique au rotor, est alimentée en courant continu.

Le stator, composé d'une culasse et de deux couronnes feuilletées disposées de part et d'autre de l'inducteur, reçoit le bobinage induit.

Le rotor porte également deux couronnes dans lesquelles des dents représentent les pôles. Le flux se referme entièrement par la culasse, ce qui entraîne deux conséquences :

— la *culasse doit être prévue* avec une section suffisante pour assurer le passage du flux ;
— la *constante de temps du circuit* d'excitation est élevée.

Le flux n'est pulsatoire que dans les parties du stator placées au voisinage immédiat des encoches et des dents situées entre les encoches. L'épaisseur des tôles employées varie entre 0,07 et 0,4 mm suivant la fréquence.

Le flux est constant dans le rotor et il est possible de réaliser des rotors massifs. Il est parfois nécessaire, en fonction de la fréquence, de l'importance de la machine, de la forme des encoches et du rendement, de prévoir une couronne rotorique en tôles.

Par rapport aux alternateurs classiques, le poids de cuivre est plus faible, mais le circuit magnétique est plus important en raison de la mauvaise utilisation du fer.

Le flux participant à la formation de la f.é.m. est égal à la différence des valeurs maximales et minimale atteintes dans l'encoche lors de la rotation de l'inducteur. En raison des phénomènes de saturation, la f.é.m. n'est pas proportionnelle au courant d'excitation ; elle passe notamment par un maximum pour une certaine valeur de ce courant (*fig.* 94)

Ces machines se construisent pour des fréquences de 500 à 10 000 Hz, jusqu'à 1 500 kVA.

1.712. Alternateurs hétéropolaires Lorentz-Schmidt.

Dans ces machines, le circuit d'excitation est composé par plusieurs bobines produisant un flux radial. L'enroulement induit et l'enroulement inducteur sont

logés dans les mêmes tôles (*fig.* 95). Dans son mouvement, le rotor rencontre alternativement un pôle Nord et un pôle Sud et son aimantation change de signe avec une fréquence proportionnelle à la vitesse et au nombre de paires de pôles d'excitation. Il est donc le siège de pertes par hystérésis et par courants de Foucault et il est obligatoirement feuilleté.

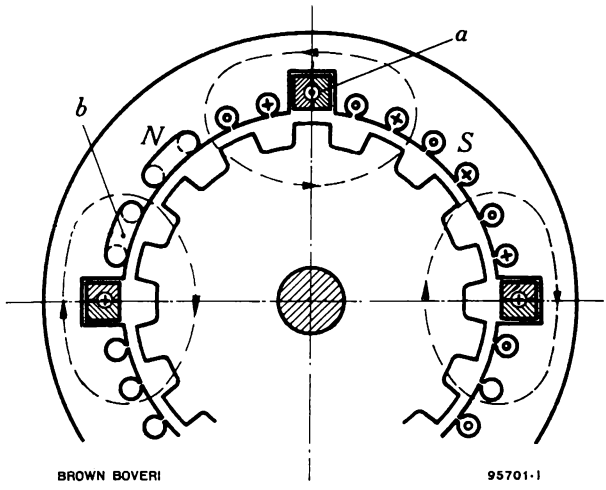


Fig. 95.
Croquis schématique d'une machine hétéropolaire du type Lorenz-Schmidt.
a = enroulement inducteur — *N* = pôle nord
b = enroulement induit — *S* = pôle sud

Le circuit magnétique du stator est également feuilleté et il est monté dans une carcasse qui, contrairement à la culasse de l'alternateur homopolaire, n'est traversée par aucun flux. De ce fait, elle est plus légère que dans les machines homopolaires et la constante de temps du circuit d'excitation est plus faible.

Les tôles du stator peuvent être tirées dans une seule pièce (*fig.* 95) ou

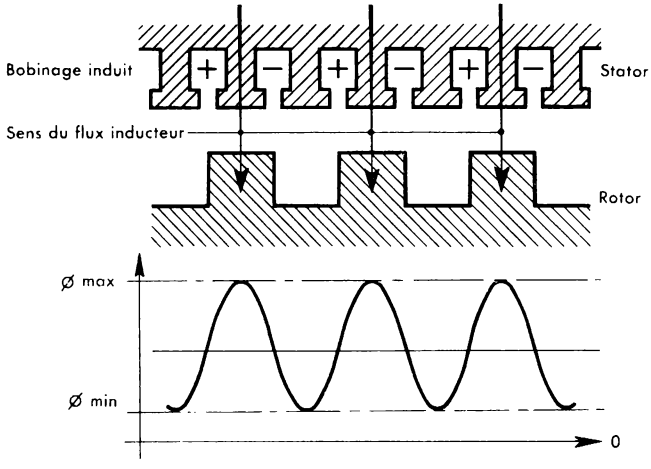


Fig. 95 *bis.*
Coupe schématique d'un alternateur à flux ondulé, du type Lorentz-Schmidt.

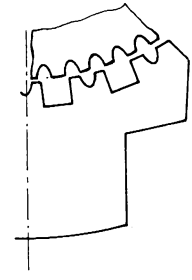


Fig. 96.

être constituées en plusieurs segments. Elles peuvent alors, dans ce dernier cas, prendre l'aspect des pôles de machines à courant continu (*fig.* 96). Pour des applications spéciales, il est possible de supprimer l'enroulement d'excitation et de le remplacer par des aimants rapportés sur les dents du rotor. Les fréquences atteintes sont généralement inférieures à 4 000 Hz.

1.713. Alternateur hétéropolaire Guy.

La *figure* 97 indique l'organisation d'une machine de ce type. Comme pour les machines Lorentz, le circuit d'excitation et les enroulements induits sont logés dans le même stator.

Le *rotor comporte toujours un nombre d'encoches et de dents alternées qui détermine ses pôles.* Il s'y produit aussi des pertes proportionnelles à la vitesse de rotation et au nombre de paires de pôles d'excitation.

Le *stator comporte des encoches sans enroulement, à l'image du rotor.* Les bobines de l'enroulement induit sont logées dans un nombre d'encoches relativement faible et disposées entre les encoches qui reçoivent les enroulements d'excitation. Il en résulte qu'une bobine de l'enroulement induit embrasse un arc qui comprend plusieurs dents situées entre des encoches ouvertes ; elle est traversée par un flux beaucoup plus important que dans la machine Lorentz dont les bobines ont une largeur seulement égale à celle d'une seule dent.

Le nombre de pôles du rotor est défini par la relation fondamentale $f = pn$, et le nombre de dents du stator est égal à :

$$z = \frac{p}{2p_e} - A,$$

en appelant :

z : le *nombre de dents du stator* par pôle d'excitation ;

p_e : le *nombre de paires de pôles d'excitation* ;

A : un *nombre entier* prenant des valeurs (1, 2, 3...) différentes suivant la largeur totale des encoches des enroulements induits et inducteurs réparties sur un arc correspondant à un pôle d'excitation. Il en résulte que le nombre d'encoches du stator est plus petit que le nombre d'encoches du rotor ; le rapport est assez souvent égal à 0,8, ce qui revient à prendre $A = 0{,}2\ p/p_e$. Par exemple, pour obtenir une fréquence 20 000 Hz, à une vitesse de 3 000 tr/mn, il faudra choisir :

$$p = \frac{20\,000}{50} = 400$$

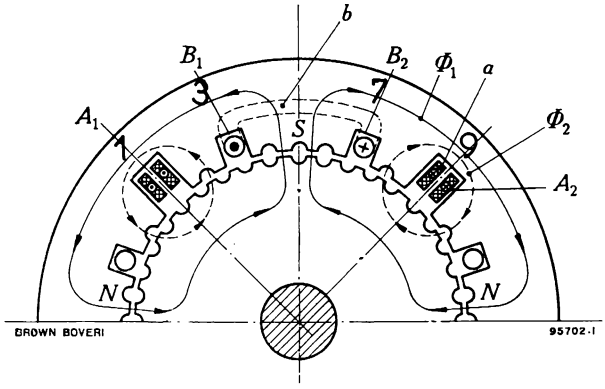
Le rotor comportera donc 400 dents et 400 encoches sur sa périphérie.

Le stator n'aurait alors que 320 encoches réparties entre les différents pôles et dont un certain nombre seulement recevrait un enroulement, la moitié par exemple, ou moins. On aurait donc 40 encoches destinées à l'enroulement d'excitation et 40 destinées à recevoir l'enroulement induit.

Si nous nous reportons au schéma de la *figure* 97, nous voyons que la bobine d'excitation logée dans les encoches 1 et 9 engendre un flux magnétique dont une partie est embrassée par la bobine induite placée dans les encoches 3 et 7. Dans la position dessinée, cette partie du flux a sa valeur maximale Φ_1 parce que, dans l'arc qui y correspond, les dents du stator et du rotor sont en face les unes des autres et que la réluctance est minimale. Le reste du flux a une valeur plus faible Φ_2, parce que, dans la région correspondante, les dents du stator sont en face des encoches du rotor et qu'à cette position correspond la réluctance maximale. Après une rotation correspondant à un pas polaire, les réluctances ont changé ; la bobine 3-7 est traversée par un flux Φ_1 et le reste du flux a pris la valeur Φ_2. La tension induite est proportionnelle à cette variation de flux Φ_1-Φ_2. On constate ainsi que la rotation du rotor a pour effet de provoquer un déplacement périodique du flux engendré par le circuit d'excitation. Il oscille en se déplaçant de part et d'autre des encoches occupées par l'induit et, pour cette raison, ces machines sont aussi appelées machines à champ oscillant (*fig.* 98). Le flux varie dans l'ensemble du circuit magnétique actif du rotor et du stator, et, pour éviter l'apparition d'une tension induite dans les enroulements de l'excitation, il est nécessaire que la somme des flux Φ_1 et Φ_2 soit constante dans le temps. A défaut de cette constance, il est indispensable de monter un enroulement amortisseur pour réduire l'amplitude de cette tension.

Afin de diminuer la réactance de la machine, on choisit une valeur convenable du rapport de la largeur des dents au pas polaire du rotor et on adopte un entrefer qui ne soit pas trop faible.

Comme le nombre d'encoches recevant un enroulement est réduit, il est facile, avec ce type de machine, d'obtenir des fréquences élevées. Dans la pratique on les utilise couramment entre 4 000 et 10 000 Hz pour des puissances pouvant atteindre 2 000 kW. Les pertes dans le cuivre sont très réduites, mais les pertes dans le fer sont généralement importantes.



a = enroulement inducteur

b = enroulement induit

Φ_1, Φ_2 = flux magnétiques

Fig. 97.
Croquis schématique d'une machine hétéropolaire du type Guy (machine à champ oscillant)

1.714. Conditions de fonctionnement.

Toutes les machines à moyenne fréquence ont une réactance de fuites importante qui détermine une chute de tension interne élevée. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer d'une force électromotrice très supérieure à la tension aux bornes, ce qui exige un courant d'excitation important. Les pertes dans le fer s'accroissent donc et diminuent le rendement. Pour remédier à ces inconvénients, on peut essayer de réduire la réactance de fuite en augmentant l'entrefer, mais cette solution exige une augmentation de la puissance d'excitation. Une autre méthode consiste à compenser la chute de tension interne par des condensateurs installés en série.

Le couplage en parallèle est possible, mais il présente des difficultés d'autant plus grandes que la fréquence est plus élevée. Les conditions à réaliser sont les mêmes que pour les alternateurs de construction classique à fréquence industrielle.

Les moteurs d'entraînement sont généralement des moteurs triphasés à cage ou à rotor bobiné et plus rarement des moteurs à courant continu à vitesse réglable lorsqu'il s'agit d'obtenir des fréquences variables. Dans le cas où des alternateurs doivent fonctionner en parallèle, les caractéristiques couple-glissement des moteurs d'entraînement doivent être aussi voisines que possible afin d'obtenir une répartition convenable de la puissance entre les différents alternateurs.

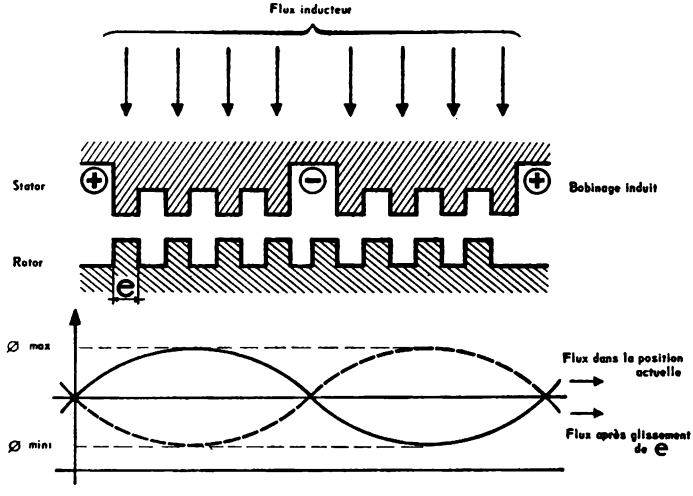


Fig. 98.

1.715. Utilisations.

Elles sont très variées et relatives :

— au *chauffage inductif* (voir tome 4) ;

— à l'*alimentation de moteurs d'induction* à vitesse élevée constante ou réglable ;

— à l'*alimentation des installations de télécommande centralisée* (voir tome 3) ;

— à la *fabrication d'ozone* ;

— à l'*usinage par étincelage* (voir tome 4).

1.8. — MOTEURS FREINS

Les machines outils modernes automatiques fonctionnent souvent à des cadences très rapides, ce qui entraîne des démarrages et des arrêts très fréquents. Il n'est plus possible d'admettre la perte de temps résultant de l'arrêt libre de la machine. Dans les appareils de levage, le freinage du moteur, pour éviter la descente libre de la charge, est également une nécessité. Les moteurs freins apportent une solution à ces différents problèmes. Nous ne mentionnerons que pour mémoire les systèmes de freinage dans lesquels une poulie placée à l'extérieur du moteur est freinée par l'intermédiaire de mâchoires ou d'une bande recevant un effort perpendiculaire à l'axe de rotation, et qui n'influent pas sur la constitution technologique du moteur. En dehors de ce système, on peut distinguer deux grands types de moteurs freins :

— *moteurs à rotor conique* ;

— *moteurs à disques.*

1.81. — MOTEURS A ROTOR CONIQUE

La *figure* 99 montre l'organisation interne de ce genre de moteur. Au repos, le rotor est poussé par un ressort et les garnitures de freinage solidaires du ventilateur appuient sur la surface de frottement. Le moteur est donc bloqué à l'arrêt ; à la mise sous tension, les efforts électromagnétiques centrent le rotor par rapport au stator et libèrent les garnitures. Le couple de freinage dépend du coefficient de frottement et du tarage du ressort ; il n'est donc pas réglable. On reproche à ce type de moteur de subir un déplacement latéral à chaque mise sous tension et à chaque arrêt ce qui peut présenter des inconvénients dans le cas d'un accouplement direct avec la machine entraînée.

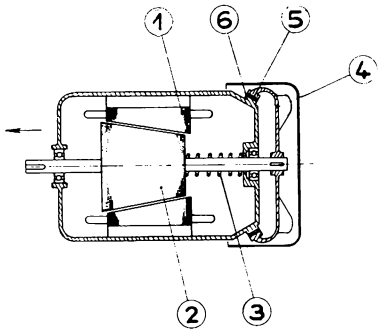


Fig. 99. — Moteur-frein à rotor conique.

1, Stator. — 2, Rotor. — 3, Ressort. — 4, Ventilateur. — 5, Garniture de frottement. — 6, Surface de frottement.

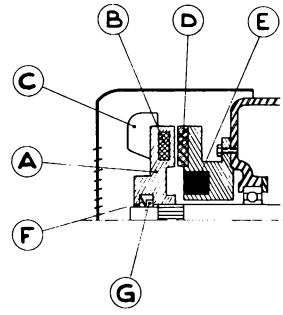


Fig. 100. — Moteur-frein à disque à aimant permanent.

A, Moyeu mobile. — *B*, Aimant permanent. — *C*, Ventilateur. — *D*, Garniture de frottement. — *E*, Bobine d'excitation. — *F*, Rondelle-ressort. — *G*, Bague en matière plastique.

(Extrait de « l'Electricien », Dunod, éditeur.)

1.82. — MOTEUR A FREIN A DISQUE

Différentes dispositions sont possibles ; elles varient suivant la nature de l'organe exerçant l'effort contre les garnitures.

1.821. Moteur frein à aimant permanent.

Il comporte essentiellement (*fig.* 100) :

- un *moyeu mobile* pouvant coulisser sur l'arbre du moteur et muni d'un aimant permanent ;
- une *couronne solidaire* du palier du moteur portant les garnitures de frottement et une bobine d'excitation ;
- un *ressort* ayant pour rôle de repousser le moyeu afin de libérer les parties frottantes.

Le frein est bloqué à l'arrêt ; la force pressante est obtenue par l'action de l'aimant permanent sur la couronne en acier. Pour libérer le frein, il suffit d'alimenter la bobine d'excitation par un courant continu ou redressé qui crée alors un champ de sens inverse à celui de l'aimant. Le réglage de la force de freinage est possible en alimentant en permanence la bobine d'excitation avec un faible courant. Du fait de l'inductance assez élevée de cet enroulement d'excitation, le déblocage se produit avec un léger retard. La nécessité de conserver un entrefer constant oblige à prévoir un dispositif de rattrapage d'usure des garnitures.

1.822. Moteur frein à électro-aimant.

Dans ces types de freins, la force de freinage est obtenue par un ressort prenant appui sur une couronne portant les garnitures de frottement ; le déblocage du frein est obtenu par un électro-aimant solidaire du palier. L'alimentation de l'enroulement peut se faire soit en courant continu ou redressé, soit en courant triphasé. Les *figures* 101 *a* et 101 *b* montrent l'organisation de ce type de frein.

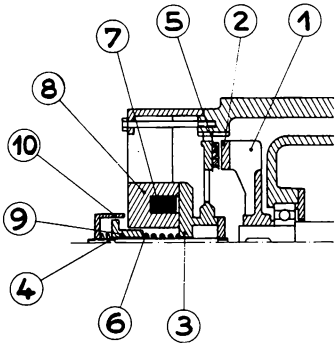


Fig. 101 *a.* — Frein à disque alimenté en courant redressé. 1, Ventilateur. — 2, Surface de frottement. — 3, Armature mobile. — 4, Axe fixe. — 5, Garniture de frottement. — 6, Ressort. — 7, Bobine d'électro-aimant. — 8, Culasse fixe. — 9, Douille. — 10, Ecrou.

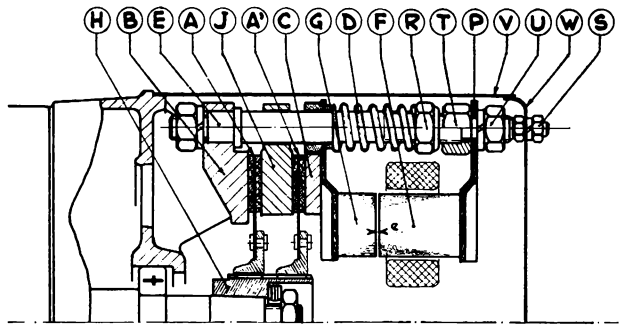


Fig. 101 *b.* — Frein à disque alimenté en courant triphasé. *A-A'*, Disque de freinage avec garniture de freinage. — *B*, Plateau fixe. — *C*, Ensemble mobile. — *D*, Ressort de rappel. — *E*, Colonne de coulissement. — *F*, Culasse bobinée de l'électro-aimant. — *G*, Armature. — *H*, Douille cannelée. — *J*, Couronne de frottement. — De *R* à *S*, Visserie.

(Extrait de « l'Électricien », Dunod, éditeur.)

1.9. MACHINES A FLUX AXIAL

Ces machines, également dites à rotor plat, diffèrent essentiellement des machines conventionnelles en ce que le flux se propage parallèlement à l'axe au lieu d'être radial.

La disposition de leurs organes rappelle le principe de la roue de Barlow.

Elles peuvent être conçues sous forme de machines à courant continu, d'alternateurs ou de moteurs asynchrones.

1.91. — MACHINES A COURANT CONTINU

La figure 102 indique le principe d'une telle machine.

◆ **Inducteurs.**

Bien qu'il soit possible, théoriquement, d'envisager la production du flux par des électro-aimants, cette solution n'a pas été utilisée dans les réalisations

actuelles. Les inducteurs sont constitués par des aimants fondus montés, en polarité alternée, sur une couronne, ou par un tore en ferrite dur à l'intérieur duquel on a fait apparaître des pôles alternés en nombre lié à la polarité désirée.

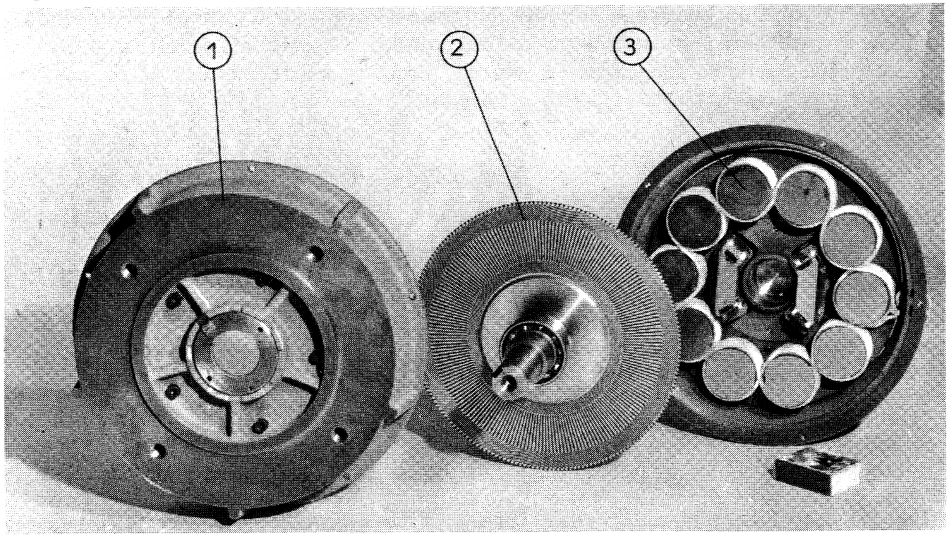


Fig. 102. — 1. Carcasse-flasque ; 2. Induit ; 3. Inducteur à aimant permanent.

◆ **Culasse.**

Le flux magnétique produit par les aimants permanents se ferme par le boîtier en acier doux, englobant extérieurement l'ensemble de la machine.

◆ **Induit.**

Il se présente sous la forme d'un disque isolant mince sur les faces duquel est déposé le circuit électrique. Le bobinage est constitué par du cuivre nu de très faible épaisseur, déposé par les techniques propres aux circuits imprimés (1).

Si la puissance désirée l'exige, plusieurs disques peuvent être montés sur le même arbre.

Le collecteur est supprimé ; les balais, solidaires du boîtier, frottent directement sur les conducteurs.

1.92. — ALTERNATEURS

Il est possible de conserver la même disposition que pour les machines à courant continu, et de recueillir le courant sur un jeu de bagues, ou bien de prévoir un inducteur tournant et un bobinage induit fixe.

(1) Dépôt électrolytique sur le disque isolant, ou attaque chimique d'une feuille de cuivre plaquée sur le disque.

Lorsqu'on utilise des inducteurs tournants, le flux, se refermant par le boîtier massif, y produirait des courants de Foucault. On évite cet inconvénient en montant sur l'arbre des couronnes en ferrite doux ou en tôles spiralées par lesquelles se referme le flux. Ces couronnes, du fait de leur rotation, ne sont soumises à aucune variation de flux.

1.93. — MOTEURS ASYNCHRONES

Le bobinage inducteur est monté sur une culasse fixe formée par une couronne mince en tôle spiralée. Le circuit induit tournant est formé par un disque mince métallique, une cage d'écureuil, ou un disque muni d'un bobinage imprimé.

1.94. — CARACTÉRISTIQUES PROPRES AUX MACHINES A FLUX AXIAL

Par rapport aux machines traditionnelles, on peut relever les différences suivantes :

— géométrie totalement différente, conduisant à une machine dont le diamètre est beaucoup plus important que la longueur (rapport variant de 3 à 7) ;

— absence d'inertie permettant des accélérations et des freinages très rapides ;

— auto-induction très faible des bobinages, conduisant, dans le cas d'une machine asservie, à un temps de réponse très réduit ;

— absence de courant d'excitation, facilitant, sur les moteurs à courant continu, l'inversion du sens de rotation ;

— refroidissement excellent des conducteurs ; la densité de courant atteint dix fois la valeur admise dans les machines classiques homologues, soit 30 à 50 A/mm^2 en service permanent et 150 A/mm^2 en service de pointe ;

— inertie thermique très réduite ;

— encombrement axial réduit ;

— rendement élevé ;

— puissance massique élevée.

1.10. — GROUPES BULBES

Le désir d'exploiter des chutes d'eau peu importantes, dans des conditions économiques favorables, a conduit les constructeurs à modifier leurs techniques de construction des petites usines hydrauliques traditionnelles. Les études et essais entrepris ont abouti à la mise au point des groupes bulbes immergés.

◆ **Principes de construction.**

La machine électrique et la turbine forment un ensemble compact noyé dans la conduite d'eau, de telle sorte que l'eau s'écoule parallèlement à l'axe de la machine ; de là, le nom de groupes à écoulement axial également donné à ces machines (*fig.* 103).

Les génératrices peuvent être synchrones (puissances de 500 à 20 000 kW) ou asynchrones (puissances de 50 à 2 000 kW).

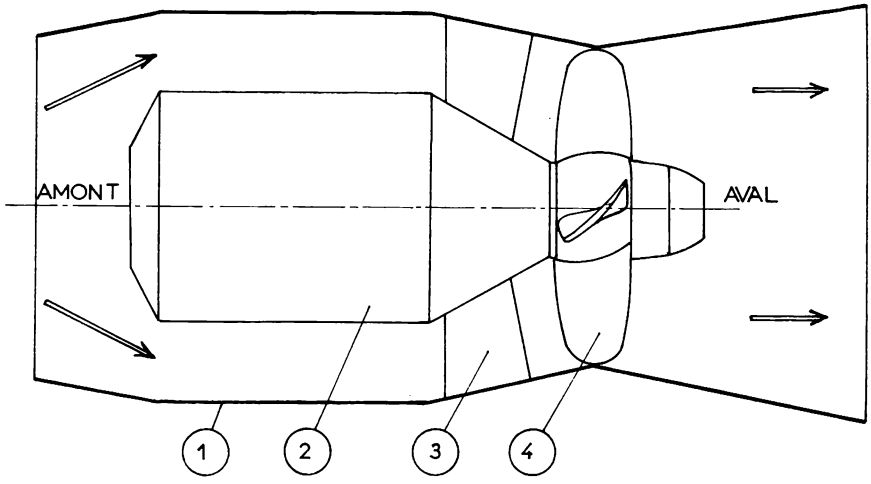


Fig. 103.

1. Conduit.
2. Génératrice.
3. Distributeur.
4. Turbine.

Si le principe de fonctionnement ne présente aucune particularité, il faut noter, en revanche, quelques caractères particuliers propres à la technologie des groupes bulbes :

— Dans le cas de machines synchrones, la présence d'une machine à courant continu à collecteur et de bagues pour le rotor de l'alternateur obligent à prévoir un entretien peu compatible avec la rusticité souhaitée pour l'ensemble de l'installation. La solution appliquée très souvent consiste à disposer un alternateur auxiliaire à induit tournant, entraîné par le groupe. Le courant est redressé par un pont de redresseurs secs tournant avec la machine, et la liaison aux inducteurs de l'alternateur principal peut se faire sans aucun contact glissant.

— L'eau d'écoulement est en contact avec la carcasse du générateur. Il en résulte un refroidissement excellent, ce qui permet de supprimer les réfrigérants. En revanche, il existe un certain danger d'infiltration contre lequel on lutte par divers moyens :

• étanchéité soignée de la carcasse ;

• enrubannage continu des conducteurs d'induit avec des isolants polymérisables par traitement thermique, de façon à obtenir une isolation imperméable ;

• collage des tôles entre elles par une résine époxyde et montage à force des tôles dans la carcasse ;

• remplissage de la carcasse avec de l'huile sous une pression statique supérieure à celle de l'eau extérieure. Cette solution, *a priori* séduisante, présente cependant quelques inconvénients : augmentation des pertes mécaniques, absorption d'humidité par les phénomènes de respiration, en très faible quantité, mais cependant suffisante pour diminuer les qualités diélectriques de l'huile ; échauffement non négligeable de l'huile en cas d'emballement ;

• surpression de l'air de refroidissement à l'intérieur de la carcasse.

◆ Principes d'installation.

L'installation des groupes bulbes doit se faire aux moindres frais. Le prix de revient de l'ensemble turbine-générateur étant sensiblement équivalent à celui d'un groupe traditionnel de même puissance, l'économie doit être recherchée sur les travaux de génie civil et sur les conditions d'exploitation.

Les différents schémas d'installation hydraulique peuvent se ramener à quatre types :

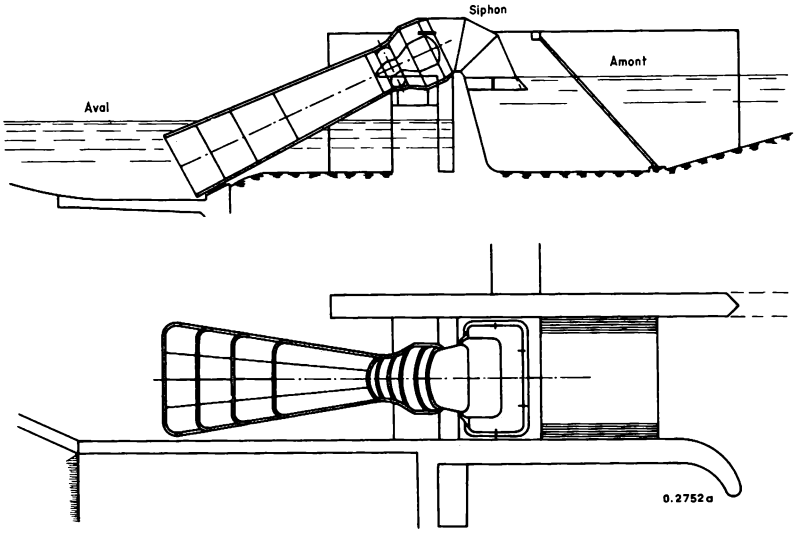
— installation en siphon (*fig.* 104) ;

— installation en pertuis (*fig.* 105) ;

— installation en conduit (*fig.* 106) ;

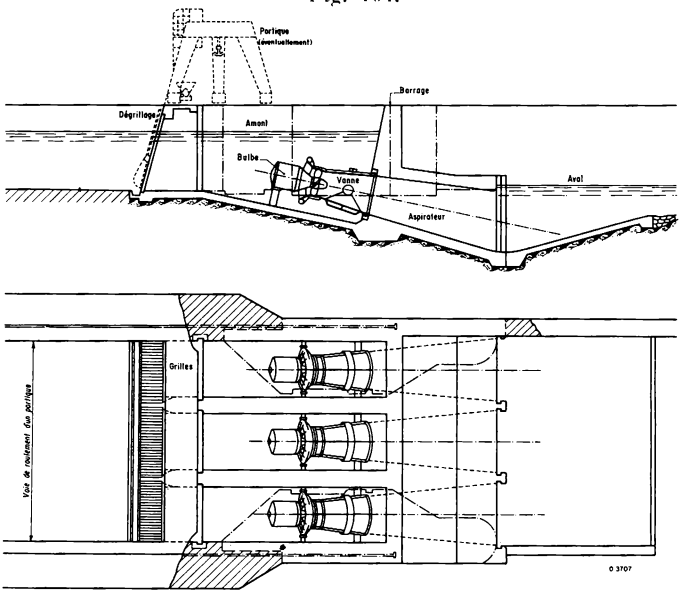
— installation en chambre d'eau (*fig.* 107).

Les conditions d'exploitation sont également très différentes de celles rencontrées sur les groupes traditionnels. La puissance des groupes bulbes est généralement modeste devant celle du réseau sur lequel ils débitent ; il est donc



(Document Jeumont-Schneider.)

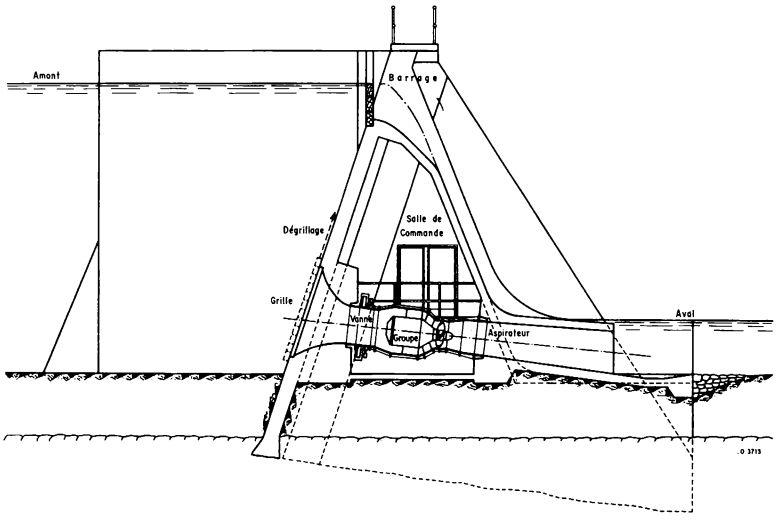
Fig. 104.



(Document Jeumont-Schneider.)

Fig. 105.

possible de simplifier, voire même de supprimer certains appareillages de régulation. C'est ainsi que la tension et la vitesse étant imposées par le réseau, l'appareillage de régulation correspondant peut être supprimé.



(Document Jeumont-Schneider.)

Fig. 106.

La commande est généralement automatique ou contrôlée à distance à partir d'une usine voisine plus importante. Quelques particularités sont à signaler :

— inertie très réduite autorisant des démarrages rapides, en des temps de l'ordre de la seconde, mais difficilement conciliable avec le fonctionnement en réseau séparé ;

— rendement excellent dû au trajet direct de l'eau à travers la turbine.

Ces machines permettent l'exploitation de chutes d'eau jugées auparavant non utilisables d'une manière rentable avec des machines traditionnelles. De là leur intérêt dans les cas suivants :

— microcentrales, généralement asynchrones, installées sur des canaux, avec des puissances pouvant descendre jusqu'à 50 kW ;

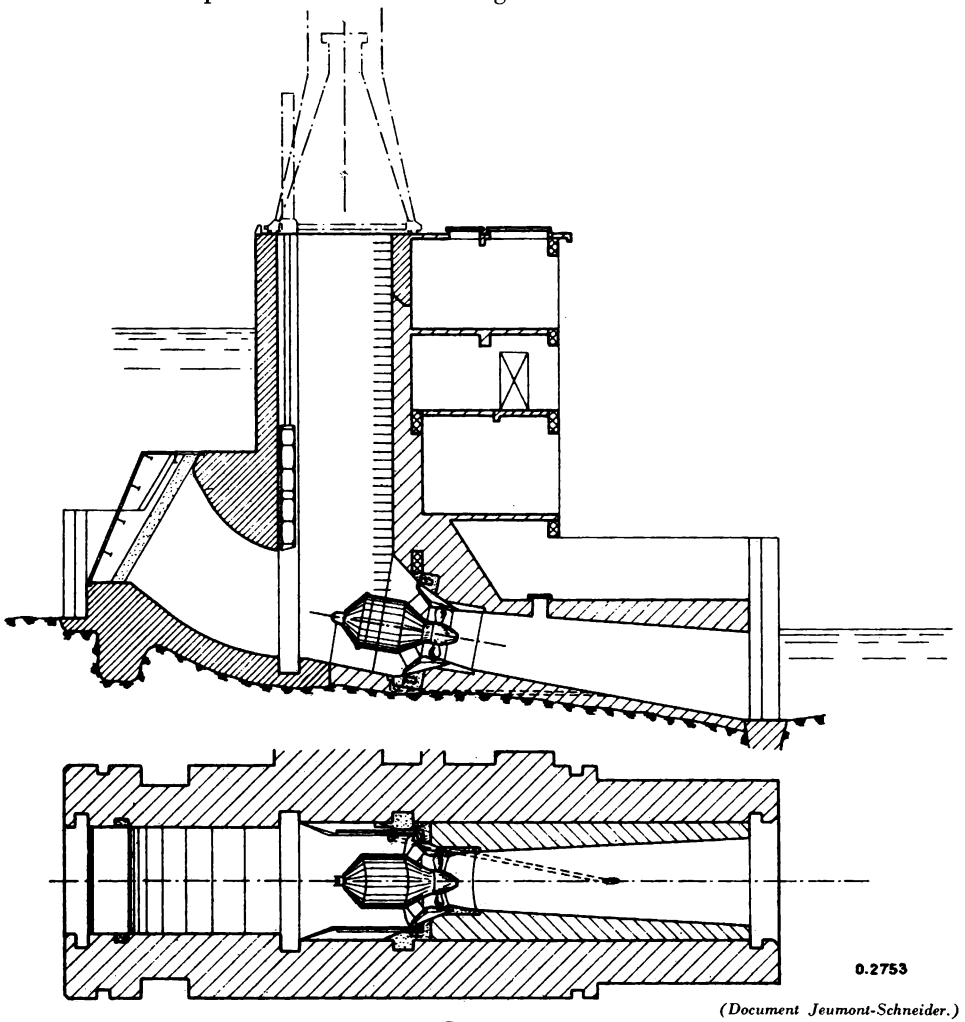
— chaînes de barrages répartis sur le cours d'une rivière (1) ;

(1) L'aménagement de la Maulde (Haute-Vienne) comprend 6 barrages dans lesquels sont installés 23 groupes bulbes asynchrones de 816 kW chacun, tournant légèrement au-dessus de 500 t/mn, et turbinant 7,5 m^3/s sous 13 m de hauteur de chute. L'installation est du type en conduit.

— équipement des barrages de compensation. Ces barrages sont destinés à régulariser le débit de l'eau restituée par les centrales fonctionnant par éclusées ;

— équipement de rivières ;

— usines marémotrices. Dans ce cas, l'alternateur est utilisé en générateur pendant un certain temps des périodes de flux ou de reflux. Afin d'augmenter les hauteurs de turbinage, la machine électrique est utilisée en moteur et la turbine en pompe pendant une partie des périodes de non turbinage.



(Document Jeumont-Schneider.)

Fig. 107.

TABLEAU I

Fonction à assurer	Conditions d'un fonctionnement rationnel et économique	Caractéristiques magnétiques ou électriques	Incidences sur le choix des matériaux et la construction
Assurer le transport du flux entre les enroulements.	Courant magnétisant minimal.	Réluctance faible.	Perméabilité élevée ; Section des noyaux importante ; Longueur des noyaux faible ; Entrefer réduit au minimum.
	Pertes par courants de Foucault réduites.	Résistivité élevée.	Feuilletage du circuit dans la direction du flux.
	Pertes par hystérésis réduites.	Cycle d'hystérésis réduit. Coefficient de Steinmetz faible.	
	Pas de déformation de la tension secondaire.	Absence de saturation.	Induction choisie à une valeur n'entraînant pas la saturation.

2. Transformateurs

2.1. — CONSTITUTION GÉNÉRALE

Du point de vue électrotechnique, un transformateur comprend essentiellement :

— un *circuit électrique primaire*, se comportant en récepteur à force contre électro-motrice, et relié au réseau fournissant l'énergie ;

— un *circuit électrique secondaire*, se comportant comme un générateur à force électro-motrice et débitant sur les récepteurs ;

— un *noyau magnétique* assurant le transport du flux, dans les meilleures conditions, entre les deux enroulements.

Sur le plan technologique, il y a lieu d'ajouter à ces organes essentiels :

— un *système de refroidissement* évacuant les pertes ;

— des *organes de prises de courant*, constitués par les traversées ;

— un *commutateur de réglage* permettant d'agir sur la tension en fonction de l'état de la charge secondaire et de la valeur de la tension primaire ;

— éventuellement, un *enroulement tertiaire* servant au réglage du facteur de puissance des lignes de transport ;

— des *organes annexes*, ayant pour but de contrôler la marche ou de faciliter l'exploitation.

2.2. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Le *tableau* I indique les fonctions que doit assurer le circuit magnétique et les conditions auxquelles doit satisfaire sa fabrication.

L'examen du tableau justifie l'emploi de tôles isolées, à faibles pertes, et la forme donnée aux circuits, de telle sorte que le rapport entre le volume du cuivre et le volume du fer reste entre certaines limites, ce qui est la condition primordiale pour obtenir le minimum de fuites de flux et le meilleur rendement global.

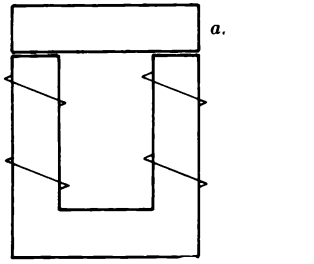
2.21. — DIFFÉRENTES FORMES

Elles diffèrent suivant le nombre de phases et la puissance mise en jeu.

2.211. Transformateurs monophasés.

Les circuits utilisant des tôles laminées à chaud ont la forme indiquée par la *figure* 1.

L'utilisation de tôles à cristaux orientés n'est intéressante que dans la mesure où le flux se propage dans la direction du laminage. De là, la technique des circuits de petite puissance constitués par une bande enroulée sur un mandrin, puis sciée (*fig.* 2).



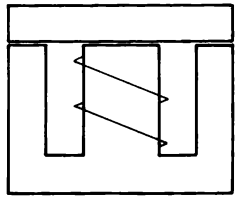


Fig. 1.
a. Circuit en U.
b. Circuit en E ou cuirassé.

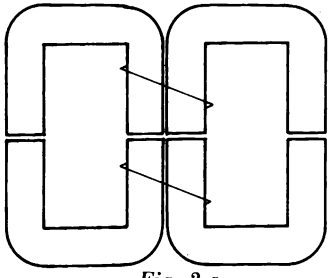


Fig. 2 *a.*

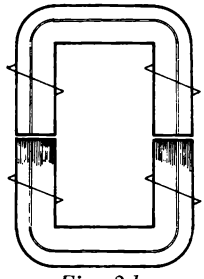


Fig. 2 *b.*

Pour tous les transformateurs de faible puissance, jusqu'à quelques kVA, la section du noyau est carrée ou rectangulaire.

Pour les transformateurs de mesure, on emploie des circuits toriques constitués par une bande de tôle enroulée en spirale.

Pour les transformateurs de puissance élevée, la section du noyau se rapproche le plus possible de celle du cercle. Rappelons que la puissance d'un transformateur est proportionnelle au produit du flux par les ampères-tours. Le flux étant déterminé par la section du noyau, la longueur du fil et, par suite, les pertes dans le cuivre seront d'autant plus faibles que le rapport périmètre/section sera plus faible. De toutes les figures géométriques, c'est le *cercle* qui possède le plus petit rapport.

Dans les grandes puissances l'adoption de plusieurs noyaux latéraux permet de diminuer la hauteur des colonnes (*fig.* 2 *bis*).

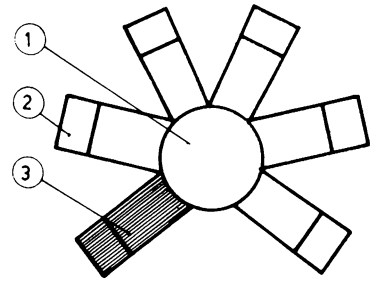


Fig. 2 *bis.*
1. Noyau central à tôles enroulées. 2. Noyau latéral de retour. 3. Culasse de retour.

2.212. Circuits triphasés.

Actuellement, les tôles laminées à froid ont supplanté complètement les tôles ordinaires ; on ne rencontre ces dernières que sur des machines spéciales ou anciennes.

◆ **Circuit à colonnes** (*fig.* 3).

On lui reproche une légère dissymétrie, ce qui entraîne un déséquilibre dans les courants magnétisants. La phase bobinée sur la colonne centrale absorbe un courant magnétisant inférieur de 10 % environ à celui des deux autres phases ; en charge, ce déséquilibre disparaît.

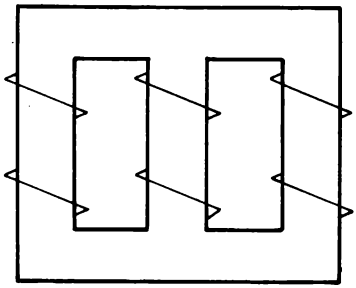


Fig. 3.

◆ **Circuit cuirassé à cinq noyaux** (*fig.* 4).

Il permet des fonctionnements déséquilibrés, et surtout de réduire la hauteur des culasses, ce qui est intéressant pour les très grosses puissances.

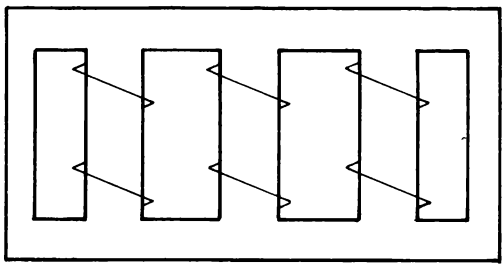


Fig. 4.

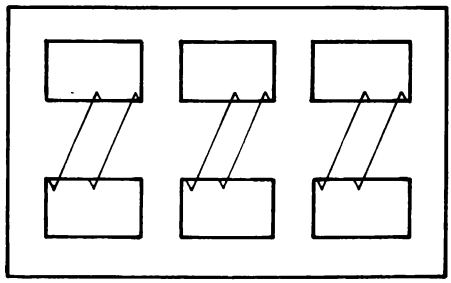


Fig. 5.

◆ **Circuit cuirassé imbriqué.**

Il s'obtient en juxtaposant, selon le schéma de la figure 5, trois circuits monophasés cuirassés.

◆ **Circuit symétrique à colonne** (*fig.* 6).

Sa réalisation a été rendue possible par l'utilisation de tôles enroulées. Les culasses sont constituées également par des bandes enroulées sur un mandrin triangulaire.

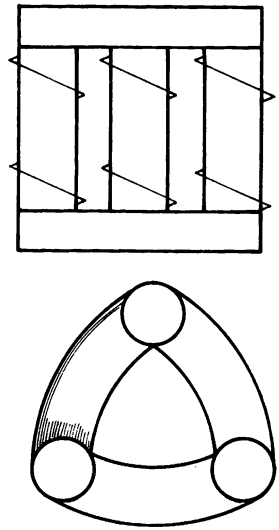
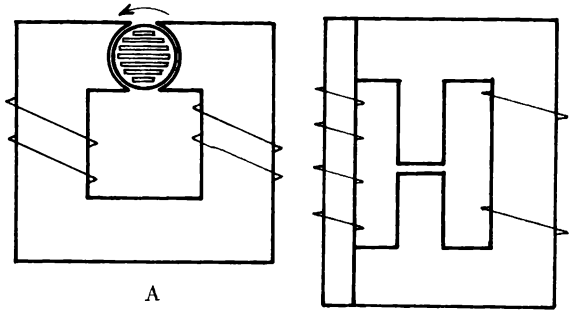


Fig. 6.

2.213. Circuits spéciaux.

Nous indiquerons les circuits à réductance variable destinés aux transformateurs de soudage, les circuits à fuites, les circuits à culasse saturable destinés à la production d'impulsions (*fig.* 7).



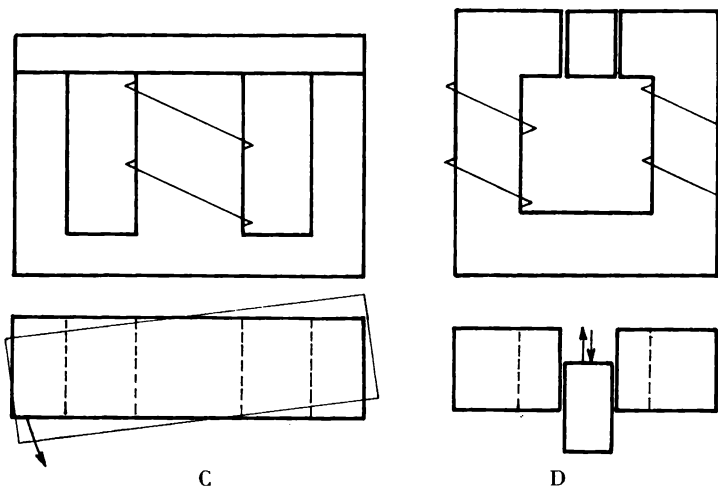


Fig. 7.

Fig. 7.

A. Circuit à réluctance variable. La variation de réluctance est obtenue en faisant tourner le noyau de sorte que les fentes soient plus ou moins obliques par rapport à la direction du flux.

B. Circuit à fuites. Si le noyau recevant le secondaire a un cycle d'hystérésis à saturation brusque, on obtient un transformateur d'impulsions.

C. Réluctance variable par déplacement de la culasse.

D. Réluctance variable par déplacement d'un shunt magnétique.

2.22. — ASSEMBLAGE DES CIRCUITS

Le dispositif employé dépend surtout de la puissance mise en jeu et de la qualité des tôles.

2.221. Transformateurs monophasés de très faible puissance.

Ils sont généralement montés sur des châssis ; les *figures* 8 indiquent les différentes variantes de montage et de fixation.

Afin d'éviter au maximum les fuites de flux, les tôles sont empilées avec enchevêtrement des joints ; l'assemblage est assuré par quatre tiges filetées placées à chacun des angles du circuit.

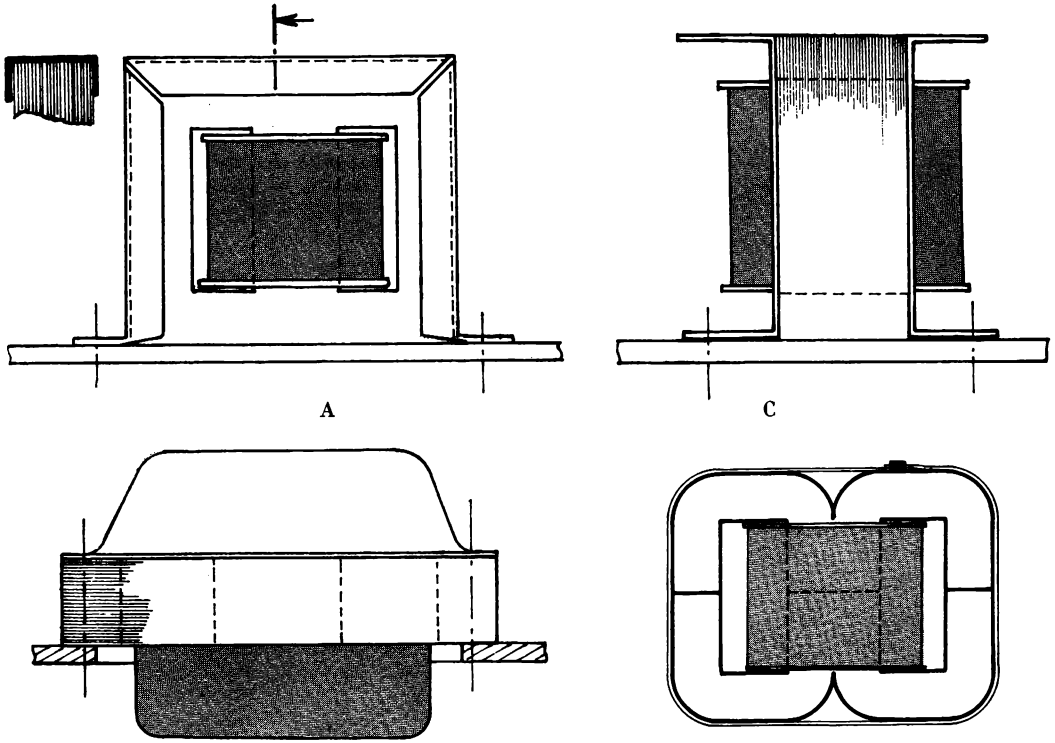
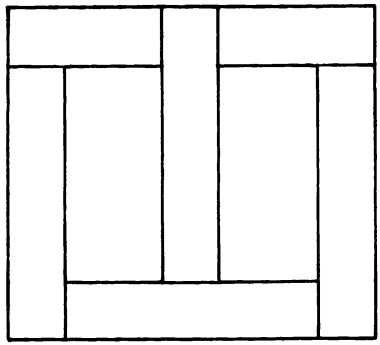
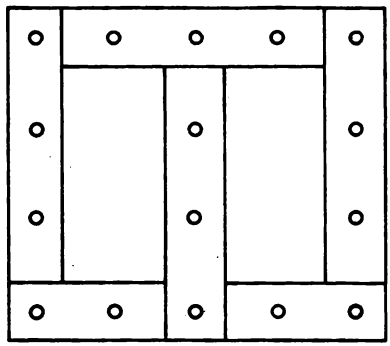


Fig. 8. — A. Montage sur étrier.
B. Montage sous capot.
C. Montage avec pattes.

Les tôles laminées à froid sont assemblées par un cerclage à l'aide d'un feuillard d'acier (*fig.* 8 D).



A



B

Fig. 9.

A. Disposition des tôles sur les couches impaires.

B. Disposition sur les couches paires.
Chaque couche peut comporter 1, 2 ou 3 tôles.
Pour simplifier le dessin, les trous n'ont été représentés que sur la figure B.

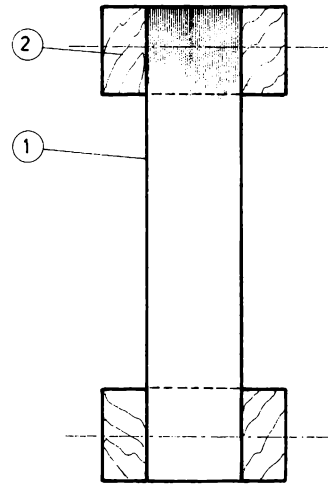


Fig. 9 *bis.*

1. Circuit magnétique.
2. Poutre de serrage.
Des tirants verticaux peuvent réunir les poutres.

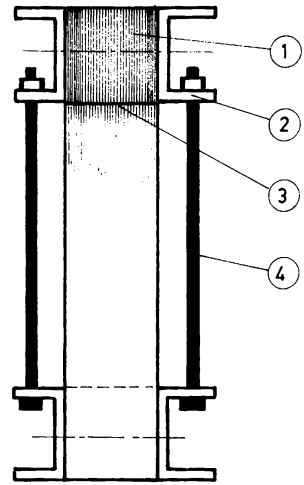


Fig. 9 *ter.*

1. Culasse.
2. Poutre de serrage.
3. Joint isolant de très faible épaisseur.
4. Tirant de serrage.

2.222. Transformateurs de puissance.

A partir d'une certaine dimension, les tôles sont découpées en bandes rectangulaires, et il devient alors nécessaire de les maintenir rigidement.

Les tôles ordinaires sont découpées à angle droit et empilées à joints enchevêtrés (*fig.* 9) ; le maintien des tôles entre elles s'effectue par des rivets ou des boulons disposés sur les noyaux. Les culasses sont serrées entre des poutres en bois ou des poutres profilées en acier. Les enroulements sont serrés axialement entre les faces intérieures de ces poutres (*fig.* 9 bis).

La culasse supérieure doit être enlevée pour le passage des enroulements. A cet effet, elle est formée, soit par des tôles enchevêtrées qui sont placées une à une après le montage des enroulements, soit par un bloc de tôles assemblées entre elles et formant un bloc rigide qui est rapporté en une seule pièce sur les noyaux et maintenu par des tirants fixés sur les poutres de serrage (*fig.* 9 ter).

L'utilisation des tôles orientées entraîne quelques précautions dans l'assemblage des circuits.

La qualité des tôles orientées est fortement altérée par un écrouissage, tel celui résultant du découpage et du poinçonnage. Il est donc nécessaire de procéder à un recuit après ces opérations ; il s'opère sous atmosphère d'azote, à une température comprise entre 800 et 810 °C, pendant une cinquantaine d'heures.

Leur caractère anisotropique, fortement marqué, oblige à prévoir la circulation du flux dans la direction du laminage, ce qui n'est pas favorable, à première vue, aux assemblages par boulons, et aux joints perpendiculaires.

Les solutions utilisées par les constructeurs sont inspirées de ces impératifs techniques, mais elles sont aussi liées à leur outillage et aux brevets en leur possession. On rencontre les dispositions suivantes :

— *utilisation de bandes enroulées* puis sciées et cerclées avec un feuillard jusqu'à des puissances de l'ordre de 1 kVA (*fig.* 10);

— *assemblage à joints perpendiculaires enchevêtrés* ; les chutes sont réduites au minimum lors du découpage, l'outillage est simple, les pertes supplémentaires n'affectent qu'une portion très faible du parcours du flux (*fig.* 9) ;

— *assemblage des noyaux principaux* par boulons de faible diamètre et réduit au nombre minimum ;

— *assemblage des culasses et noyaux latéraux*, lorsqu'ils existent, entre poutres, ou par étriers et vérins, sans trous dans les tôles (*fig.* 11) ;

— dans le cas où la largeur du noyau oblige à prévoir deux tôles (les tôles sont livrées en rouleaux de 760 mm de largeur), *on laisse entre elles un joint* mis à profit pour le passage de boulons d'assemblage et la circulation du liquide d'immersion (*fig.* 12) ;

— *assemblage avec joints à* 45° ; ce procédé évite la propagation du flux perpendiculairement à la direction du laminage mais entraîne des complications dans l'assemblage. En effet, si toutes les coupes

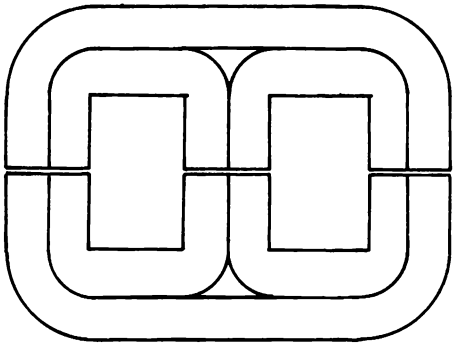


Fig. 10.

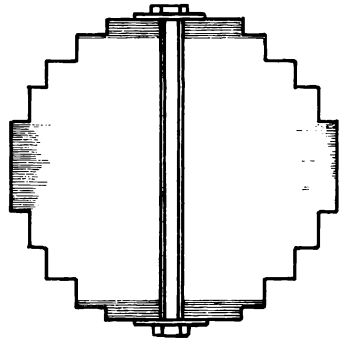


Fig. 12.

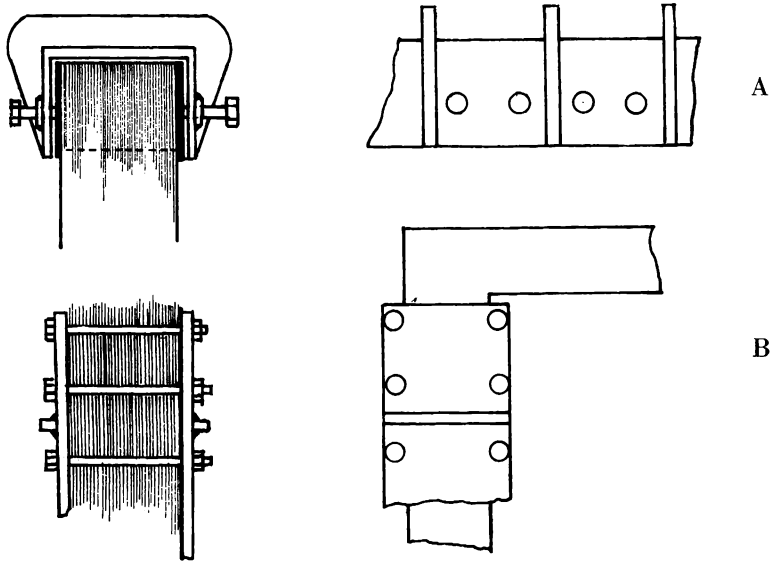


Fig. 11.

A. Assemblage culasse par vérins.
B. Assemblage noyaux latéraux par serrage entre plaques.

se font en diagonale, tous les joints se superposent ; il faut donc les décaler. Notons encore qu'afin d'assurer un bon refroidissement du circuit magnétique, des canaux de circulation sont prévus entre les paquets de tôles sur les machines de grande puissance (*fig.* 13 et 14) ;

— *noyaux à tôles radiales enroulées* : les tôles, frettées après roulage et avant recuit, sont defrettées après recuit et simplement fixées sur les culasses par l'intermédiaire de tirants traversant les noyaux (*fig.* 15).

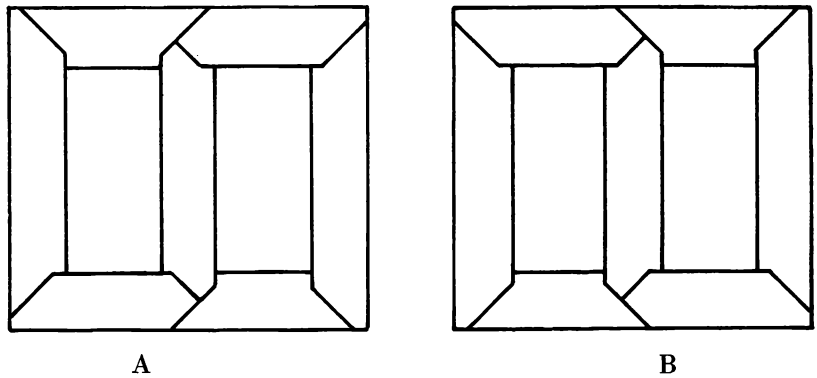


Fig. 13. — A. Tôles des couches impaires.
B. Tôles des couches paires.

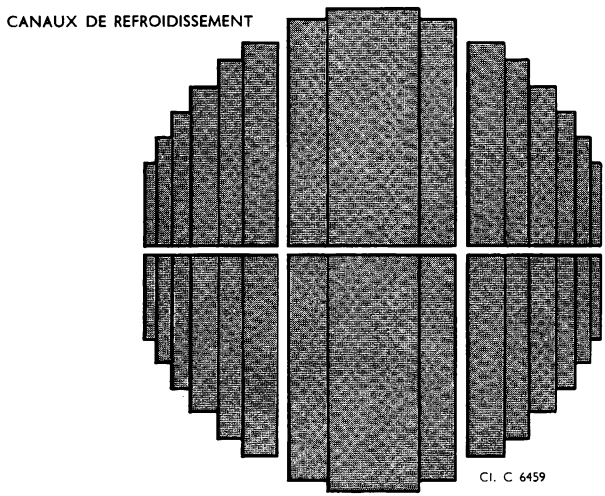
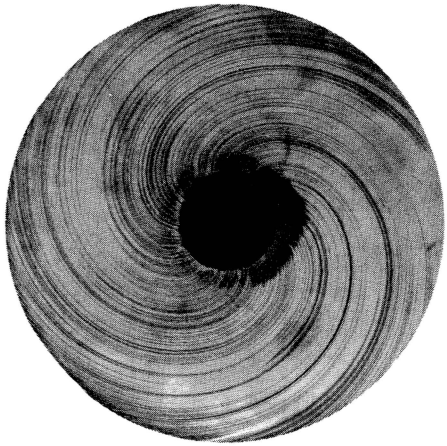


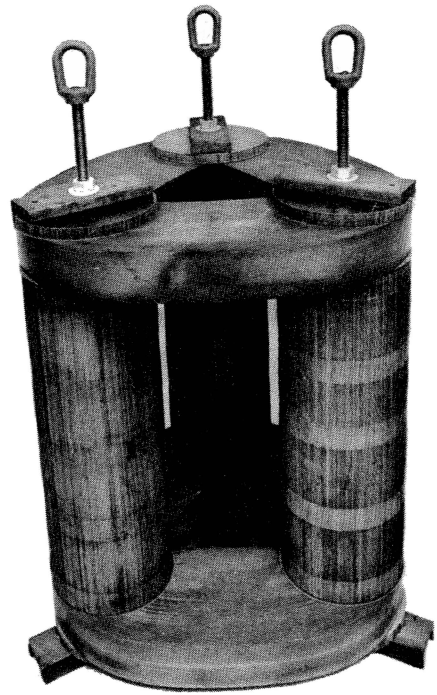
Fig. 14. — Section schématique d'un noyau magnétique.



(Document C.E.M.)

Fig. 15*b.*

Noyau d'un circuit à tôles radiales.



(Document C.E.M.)

Fig. 15*a.*

Circuit magnétique symétrique à colonnes. (Constructeur C.E.M., type ISOCEM.)

2.3. — ENROULEMENTS

Du point de vue électro-technique, les enroulements ont pour fonction essentielle d'assurer le passage de l'intensité au primaire et au secondaire. De par les phénomènes liés au fonctionnement du transformateur, ils sont soumis à des contraintes thermiques, mécaniques et diélectriques. Ces différentes contraintes, si elles sont négligées pour les petites puissances, prennent une importance telle sur les grandes machines, qu'elles influent profondément sur la construction des bobinages.

TABLEAU II.

Fonctions à assurer	Incidences sur la construction
Assurer le passage du courant sans échauffement excessif.	Conducteurs en cuivre Section suffisante.
Résister aux contraintes électrodynamiques.	Calage entre spires ou groupes de spires. Disposition judicieuse des enroulements.
Résister aux contraintes diélectriques.	Isolation entre spires, entre primaire et secondaire, par rapport à la masse.

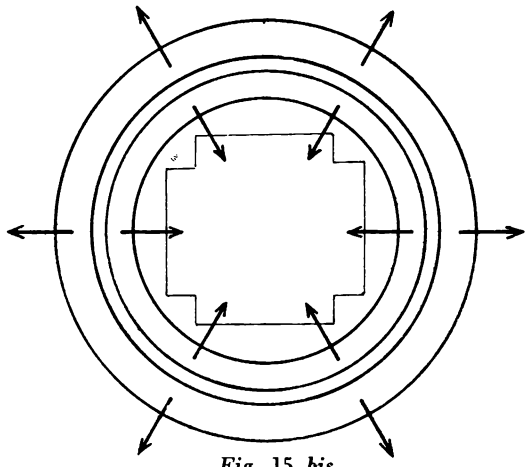
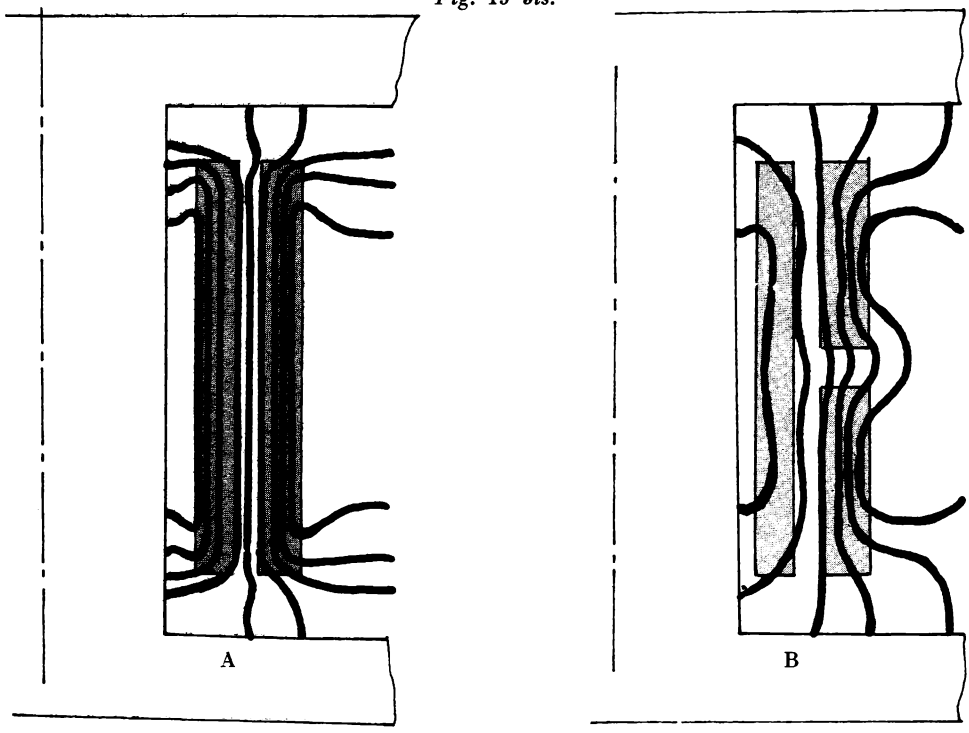


Fig. 15 *bis.*



(D'après C.E.M.)

Fig. 15 *ter.* — Tracé du champ magnétique en court circuit :
A. Dans un transformateur à bobinages régulièrement répartis.
B. Dans un transformateur avec prises de réglages au centre de l'enroulement.

2.31. — CONTRAINTES SUPPORTÉES PAR LES ENROULEMENTS (1)

2.311. Contraintes thermiques.

Elles sont pour effet d'élever la température des enroulements et obligent à prévoir des systèmes de refroidissement (*Voir page* 151 : *Systèmes de refroidissement*).

2.312. Contraintes mécaniques.

Les courants primaire et secondaire sont en opposition de phase et il apparaît entre les conducteurs des forces électro-dynamiques dirigées radialement par rapport à l'axe du noyau. Si nous supposons des enroulements concentriques, ces forces ont pour effet de comprimer la spire placée près du fer et d'agrandir la spire extérieure. Généralement, les enroulements résistent bien à ces contraintes même en cas de surintensité et il n'y a pas lieu de s'en occuper (*fig.* 15 bis).

Il apparaît également des forces axiales, dues à l'action du flux de fuite sur les courants, vers les extrémités des bobines. La disposition de ce flux de fuite varie avec l'état de charge du transformateur ; en court circuit, par exemple, le flux circule presque en entier dans le canal de fuite entre les enroulements. Elle varie aussi avec la répartition des enroulements l'un par rapport à l'autre, et, notamment, la disposition des spires de réglage a une grosse importance (*fig.* 15 ter).

La détermination de ces efforts axiaux exige des calculs très longs et très complexes pour chaque cas, et il n'a pu être mené à bien, d'une façon systématique, que grâce aux possibilités des machines à calculer électroniques.

Nous indiquerons, à titre d'exemple, la répartition des efforts axiaux en cas de court-circuit sur un transformateur de 10 000 kVA, pour différentes dispositions des enroulements (*fig.* 16).

2.313. Contraintes diélectriques.

Un transformateur est soumis, en plus de la tension nominale de fonctionnement pour laquelle il a été calculé, à des perturbations atmosphériques qui peuvent provoquer des surtensions considérables (2).

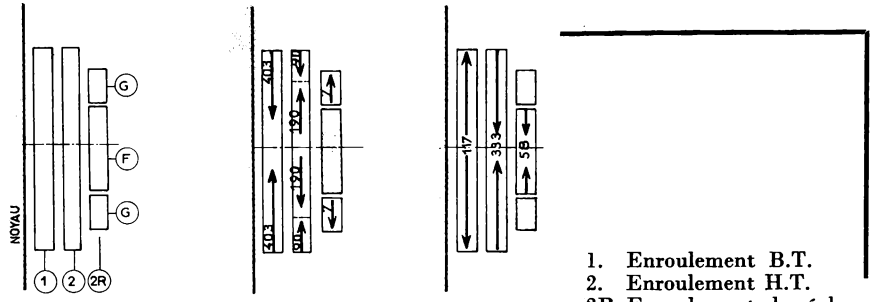
Examinons le schéma équivalent d'un enroulement (*fig.* 17). Il peut être assimilé à une inductance formée par le bobinage, et *des condensateurs résultant des capacités* réparties entre spires et entre spires et masse.

A la fréquence industrielle, les capacités sont complètement négligeables et toute tension appliquée entre le début de l'enroulement et la masse se répartira linéairement tout au long de l'enroulement.

Pour une onde de choc à front raide, la réactance de L est très grande et seules les capacités entrent en ligne de compte. Le courant ne circule pas dans L,

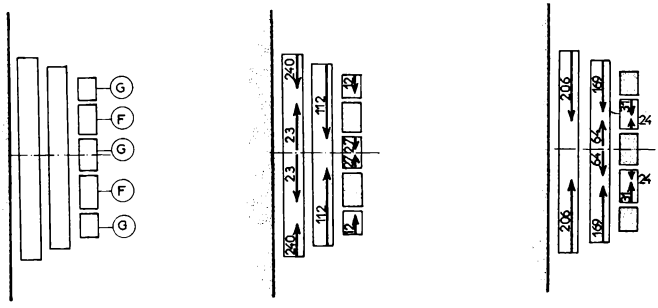
(1) Le lecteur qui ne connaît pas, du moins très sommairement, les différents types de bobinage, aura intérêt à voir le paragraphe 2.32.

(2) Voir tome 3. Appareillage. Chapitre : Protection des installations.



A 1. A 2. A 3.

1. Enroulement B.T.
2. Enroulement H.T.
2R. Enroulement de réglage.
G. Réglage grossier.
F. Réglage fin.



B 1. B 2. B 3.

Fig. 16. *(D'après C.E.M.)*

Dans la disposition A, les spires de réglages fin sont disposées globalement au centre. Les enroulements 1 et 2 ont la même hauteur.

Dans la disposition B, les enroulements 1, 2 et 2R ont des hauteurs différentes. Les spires de réglage grossiers sont réparties en trois tronçons entre lesquels s'intercalent les spires de réglage fin réparties sur deux tronçons. En A_2 et B_2 le réglage fin est éliminé. En A_3 et B_3 seul le réglage fin est en service. Les chiffres indiquent les efforts en kN.

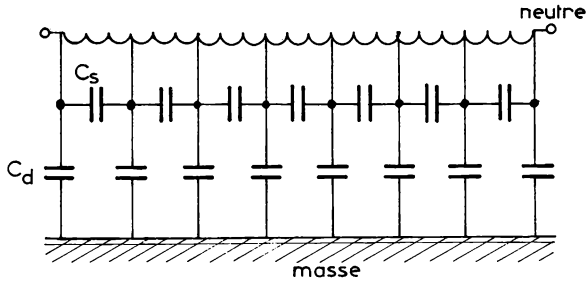


Fig. 17. — Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur.
(D'après Jeumont.)

mais dans les capacités. Les courants dérivés à la masse sont d'autant plus importants que les valeurs de C_d sont plus élevées et la répartition de la tension tout au long de l'enroulement a l'allure indiquée par la *figure* 18.

On voit que la répartition idéale est loin d'être atteinte et les premières bobines sont soumises à des tensions plus élevées que les bobines situées vers le neutre.

Le calcul indique que la forme de la courbe est liée à la valeur du rapport $\sqrt{C_d/C_s}$, qui doit être le plus petit possible pour obtenir une répartition convenable. On comprend que la disposition d'écrans à l'intérieur du bobinage, en augmentant la valeur de C_s, améliore la répartition des potentiels.

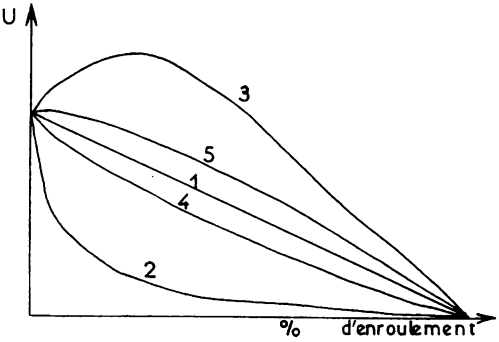
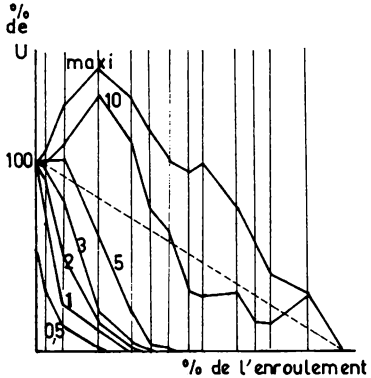


Fig. 18*a*.

Répartition des contraintes provoquées par une onde à front raide.

1. Répartition linéaire idéale.
2. Répartition initiale sur un enroulement en galettes.
3. Enveloppe des maximums d'oscillations sur bobinage en galettes.
4. Répartition initiale sur bobinage à couches.
5. Enveloppe des maximums d'oscillation sur bobinage à couches.



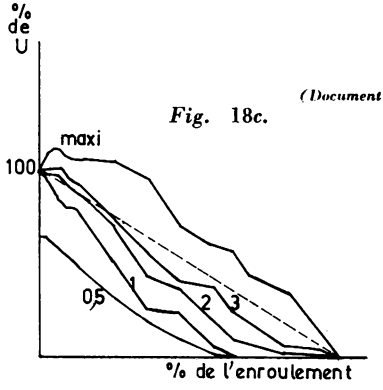


Fig. 18*b*.

(Document C.E.M.)

Fig. 18*c*.

Répartition des contraintes dues à une onde de choc sur un enroulement H.T. d'un transformateur de 20 MVA.

b. Enroulement en galettes. *c*. Enroulement à couches.

Les chiffres sur les courbes indiquent les temps écoulés en microsecondes à partir de l'application de la contrainte.

Après le passage du front de l'onde, les capacités se déchargent dans l'inductance et ce phénomène donne lieu à des oscillations dont la fréquence dépend des valeurs de L et C.

Avant la mise en évidence de ces phénomènes qui ont été découverts par des essais systématiques sur des transformateurs réels soumis à des ondes de formes diverses, il était courant de surisoler les premières bobines des enroulements, afin de leur permettre une meilleure tenue aux surtensions à front raide. En effet, ces bobines, à cause du changement brutal d'impédance d'onde, constituent un point de réflexion partielle pour les ondes à front raide.

On les appelait d'ailleurs, pour la circonstance, galettes de choc. Or, ce renforcement d'isolation peut avoir une conséquence défavorable. En effet, le renforcement de l'isolation ne peut être obtenu qu'en augmentant l'épaisseur des isolants et, par suite, la distance entre bobines. Il s'ensuit inévitablement une diminution de la capacité C_S, et les contraintes entre bobines surisolées peuvent augmenter.

Dans les transformateurs modernes, à partir d'une puissance de 30 MVA, on en est venu à graduer l'isolation tout le long de l'enroulement. Indiquons également que l'enroulement à couche est plus favorable que les colonnes à galettes.

2.32. — DIFFÉRENTS TYPES D'ENROULEMENTS

La forme et le mode de construction des enroulements sont déterminés surtout par les valeurs des pertes et des différentes contraintes, c'est-à-dire, en définitive, par la puissance du transformateur.

2.321. Enroulements pour transformateurs de faible puissance à basse tension.

Le fil enroulé à spires jointives est disposé, soit autour d'un noyau isolant, soit sur une carcasse à joues. Dans le premier cas, la dernière spire de chaque couche est arrêtée à quelques millimètres de la face du noyau afin d'assurer l'isolation contre le fer des culasses.

L'isolation entre couches est assurée par une couche de papier de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur (cristal, kraft, papier huilé). L'isolation entre le primaire et le secondaire est également assurée par quelques couches de papier.

Pour certaines applications, un écran métallique relié au circuit magnétique est disposé entre le primaire et le secondaire ; il peut être constitué d'un clinquant ou d'une couche de fil enroulé à spires jointives, mais, dans tous les cas, le circuit ne doit pas être fermé, sous peine de créer un court-circuit.

Les fils de sortie sont maintenus par un papier adhésif ou une frette en ruban (1).

---

(1) Voir 3e partie : Réalisation des bobinages.

2.322. Enroulements pour transformateurs de puissance.

La disposition des enroulements doit permettre :

— un *refroidissement correct* ;

— la *résistance aux efforts* électrodynamiques en cas de court-circuit ;

— l'*isolation entre masse et enroulements* de phases différentes.

Pour des raisons d'encombrement, le fil méplat est utilisé à partir des sections qui lui permettent d'avoir une bonne tenue mécanique.

◆ **Disposition générale des enroulements** (*fig.* 19, 20, 21).

Les enroulements concentriques qui permettent une isolation facile entre le primaire et le secondaire sont très utilisés. L'enroulement à plus basse tension est disposé contre le fer.

◆ **Disposition des conducteurs.**

— *Enroulement en couche.* Appelé aussi en hélice ou en tonneau, il est constitué par un conducteur enroulé à spires jointives sur une ou plusieurs couches. Le fil méplat, lorsqu'il est utilisé, est enroulé sur chant pour les sections modérées, et sur plat pour les très grosses sections (quelques spires par phase). Ce mode d'enroulement est utilisé en basse tension pour des puissances modérées (quelques centaines de kVA) (*fig.* 22).

— *Enroulement continu à fausses galettes à un seul conducteur.*

C'est une variante du précédent, utilisée pour améliorer le refroidissement. Le fil est enroulé à plat en forme de galettes ; le passage d'une galette à l'autre se fait tantôt par la spire extérieure, tantôt par la spire intérieure. Cet enroulement s'applique en H.T. pour des valeurs de quelques dizaines de kV. Des cales réparties entre les galettes maintiennent l'écartement des conducteurs (*fig.* 23).

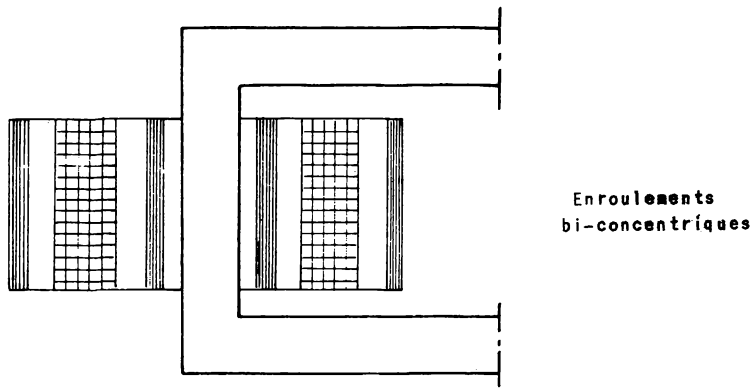


Fig. 21.

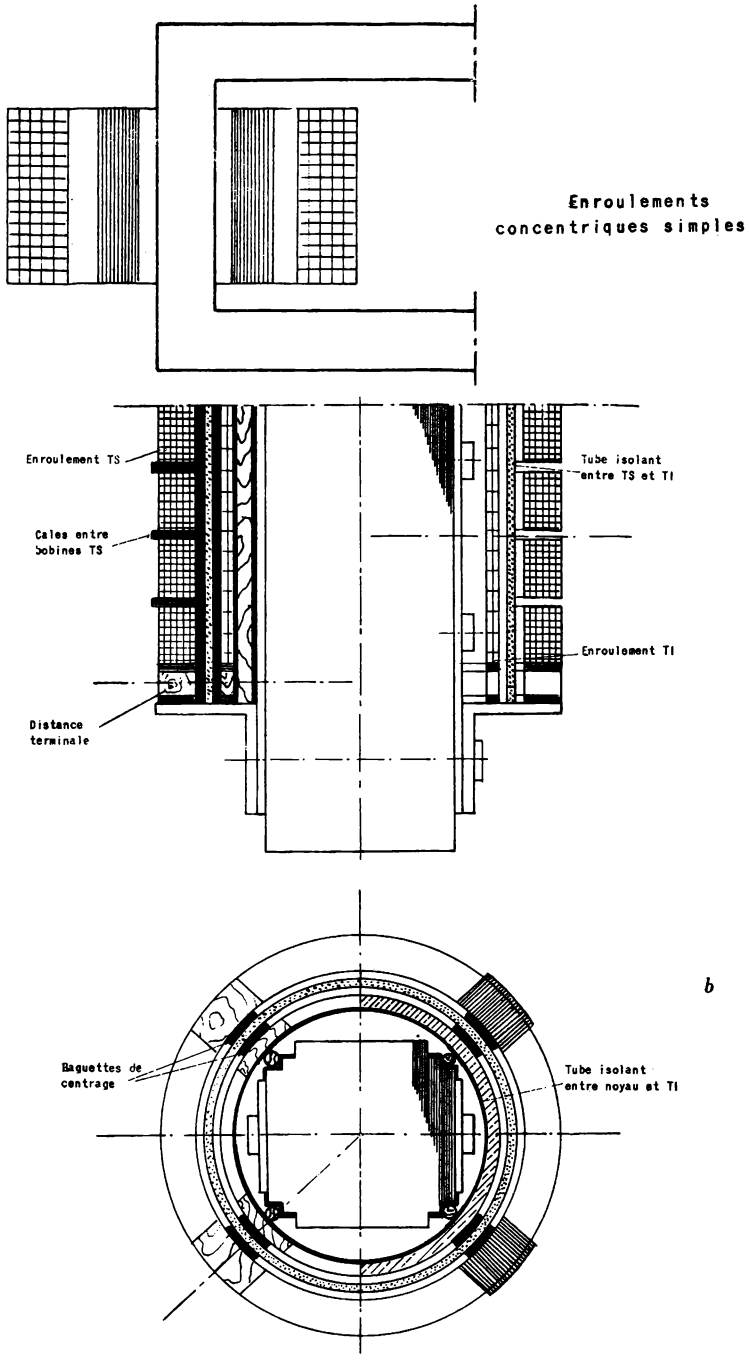


Fig. 19. — *a.* Principe de la disposition.
b. Réalisation.

Les proportions des différents éléments n'ont pas été respectées sur le schéma de principe des *figures* 19, 20, 21.

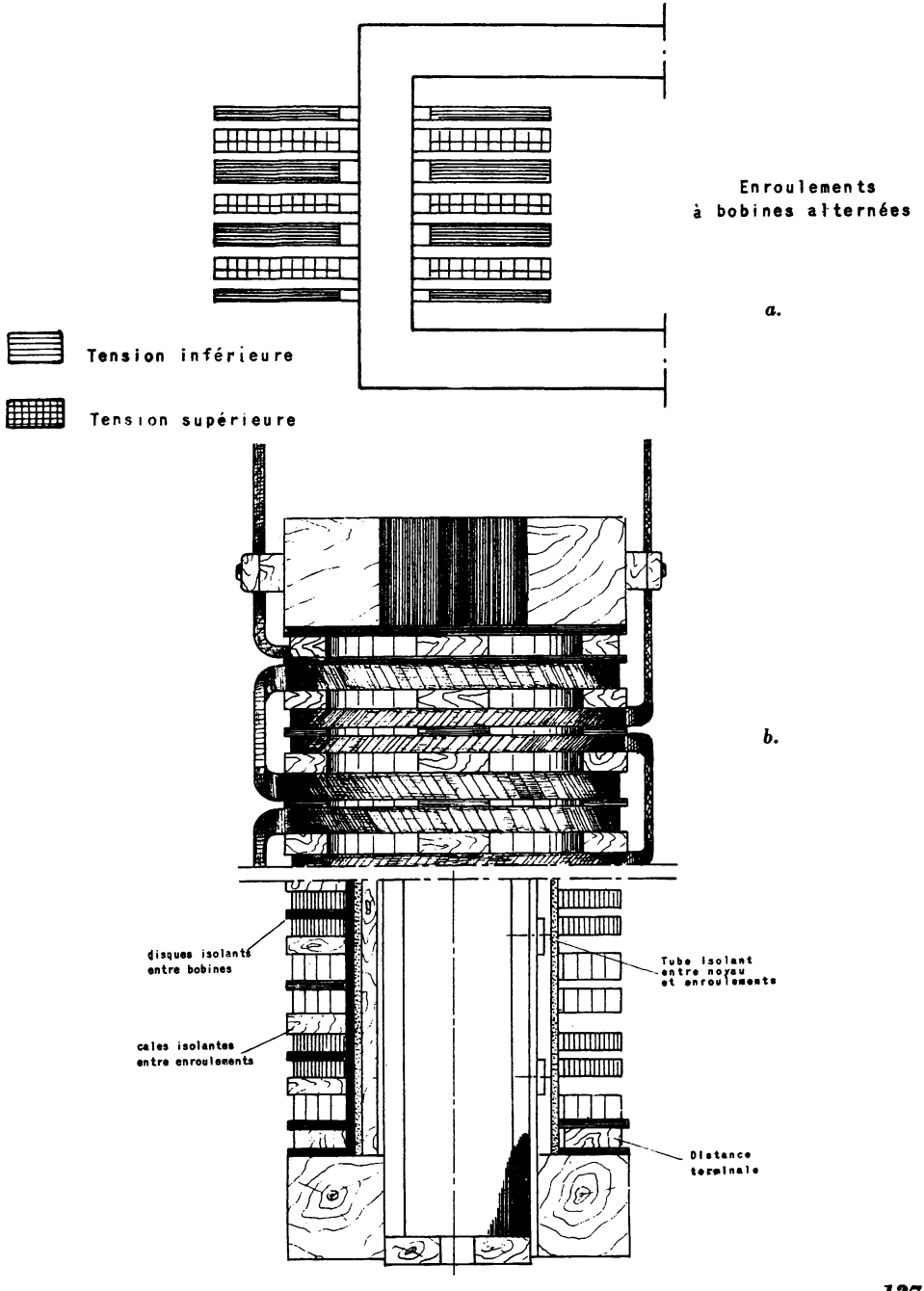
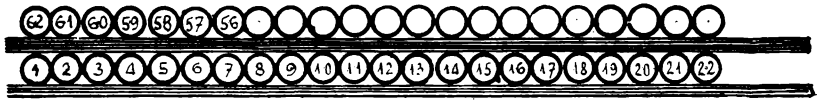
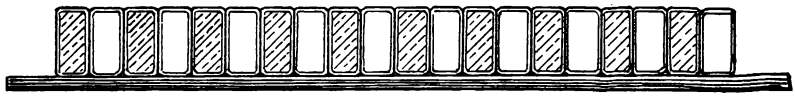


Fig. 20. — *a.* Principe - *b.* Réalisation.



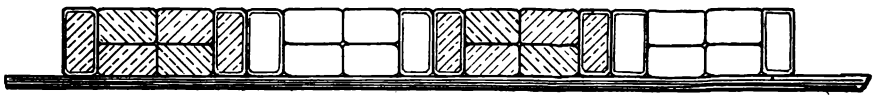
Bobinage en hélice.

1 fil rond.



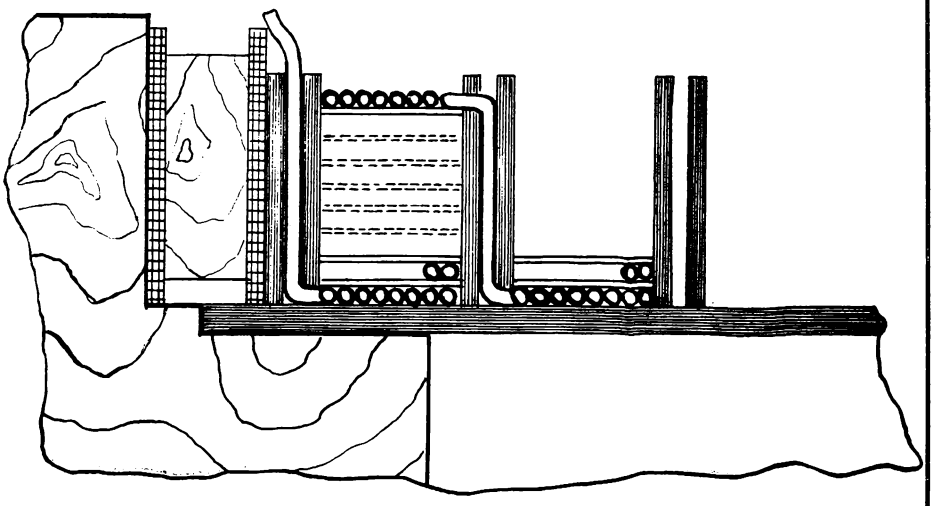
2 fils parallèles

(fil méplat sur chant).



6 fils parallèles (fil méplat).

Fig. 22 *b.* — Bobinage en hélice.



Bobinage en tonneau

Fig. 22 a.

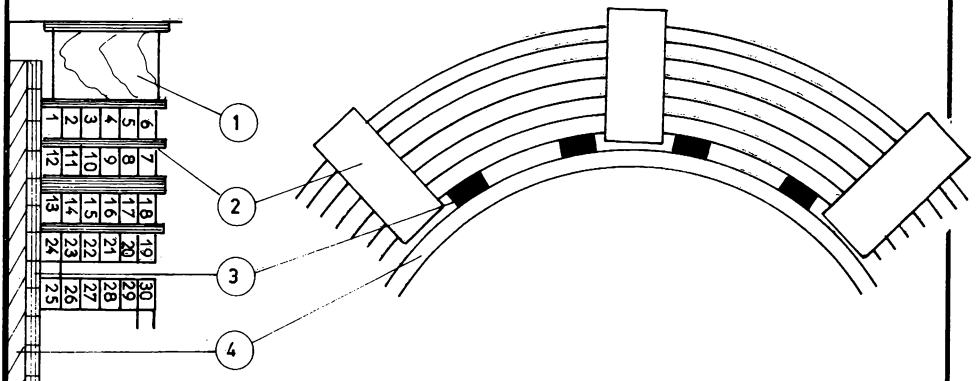


Fig. 23.

— *Enroulement continu à fausses galettes à plusieurs conducteurs en parallèle.*

Pour éviter les pertes par courants de Foucault, chaque spire est formée par plusieurs conducteurs en parallèle, enroulés à plat et superposés de façon à former une hélice à spires non jointives. Les conducteurs sont transposés, chaque conducteur élémentaire passant de la couche supérieure à la couche intérieure.

— *Bobinage à galettes.*

L'enroulement est divisé en bobines appelées galettes dont la coupe est indiquées sur la figure 24. Ces galettes sont montées en série après mise en place sur les noyaux. Pour éviter les contraintes entre les connexions de mise en série et les couches de spires des galettes, une galette sur deux est retournée au cours du montage, de façon que son sens d'enroulement soit inversé. La mise en série s'effectue alors en reliant tantôt les fils de sortie des spires intérieures, tantôt les spires extérieures.

Les galettes sont maintenues entre elles par des cales.

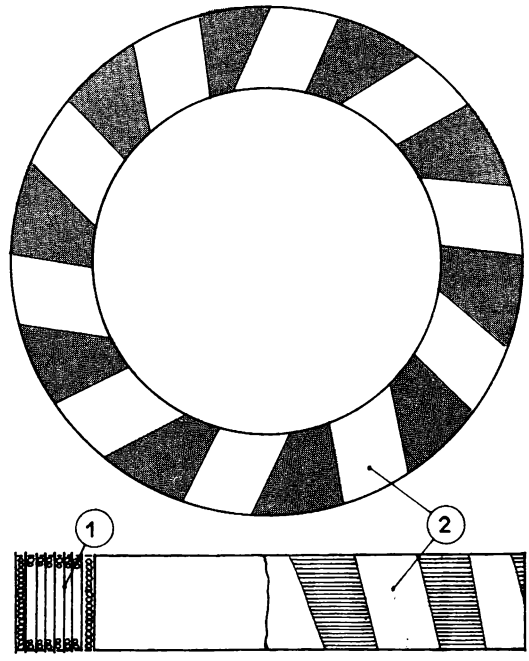


Fig. 24. — 1. Isolant entre couches de spires. 2. Ruban extérieur.

◆ **Montage des bobines sur les noyaux.**

Si nous considérons l'ensemble noyau magnétique-enroulement, ce dernier doit, pour résister aux efforts qui le sollicitent, être parfaitement immobilisé par rapport au noyau. De plus, il ne doit pas gêner le refroidissement du noyau.

L'isolation par rapport au noyau est assurée par des cylindres isolants ou des feuilles de papier enroulées. Le centrage est assuré par des cales disposées entre le noyau et le cylindre.

L'isolation entre primaire et secondaire est assurée également par un cylindre. Dans le cas de tensions élevées, les extrémités du bobinage sont protégées par des cornières isolantes ou les bords rabattus du papier d'isolation, de façon à augmenter la ligne de fuite entre masse et enroulements.

Si la distance entre les colonnes de phases différentes est faible, des écrans isolants placés entre les phases augmentent, là encore, les lignes de fuite entre phases.

Les faces inférieure et supérieure des colonnes s'appuient sur des cales en bois, ou autre matière isolante, supportées par les poutres de serrage des culasses.

Le refroidissement du transformateur exige la circulation du liquide contre les noyaux et à l'intérieur des bobinages. Aussi, il faut prévoir des canaux de circulation entre les enroulements primaires et secondaires. Pour cette raison, on laisse un jeu entre les cylindres isolants et les enroulements, le centrage s'effectuant par des cales longitudinales. Dans les très grandes puissances, il est même nécessaire de prévoir des canaux axiaux de refroidissement à l'intérieur des bobines, en plus des canaux radiaux délimités par les espaces entre galettes.

◆ **Disposition des enroulements de réglage.**

— *Amplitude du réglage.* Sur les transformateurs de distribution, il est généralement prévu un réglage de la tension par modification du nombre de spires primaires. Très souvent, on dispose de trois prises qui permettent un réglage de $\pm$ 5 % par rapport à la valeur nominale.

Sur les transformateurs de répartition ou d'interconnexion, les prises de réglage ont pour but de neutraliser les variations de tension du réseau amont et de compenser en partie les chutes de tension aval sur les réseaux à moyenne et basse tension. Le nombre de prises est alors beaucoup plus élevé et les intervalles de réglage plus rapprochés. Le réglage type comprend une variation de $\pm$ 12 % environ, avec des intervalles de réglage de 1,5 %.

— *Disposition des prises.*

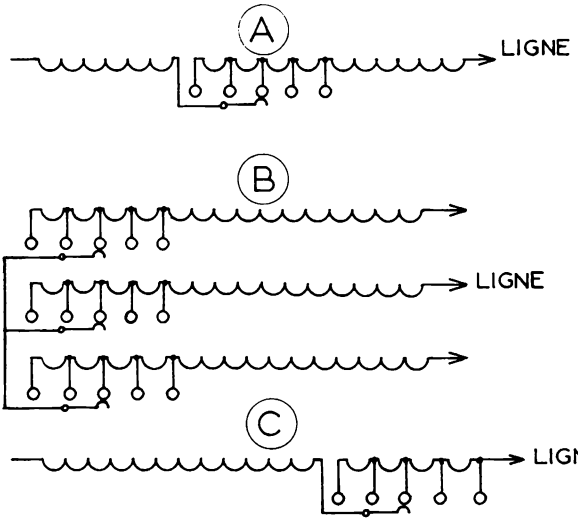
Les prises sont disposées soit en milieu d'enroulement, soit du côté du neutre. On rencontre également des transformateurs de distribution de construction ancienne, dans lesquels les prises étaient effectuées à l'entrée des bobines. Les différentes prises d'une même phase étaient alors sorties sur la même traversée.

Le réglage peut s'effectuer soit par suppression ou addition des spires, soit, plus rarement, par inversion, d'une portion de bobinage.

La répartition des spires de réglage a une grosse importance sur le comportement du transformateur en cas de court-circuit (voir 2.312). Les *figures* 25 indiquent quelques solutions utilisées.

Le commutateur de réglage hors tension associé aux transformateurs de distribution est dénué de pouvoir de coupure et il doit être manœuvré en l'absence de tension, en amont et en aval. Les commutateurs de réglage en charge sont manœuvrables en charge sans qu'il en résulte de coupure sur le circuit (1).

(1) Voir tome 3 : Réglage des circuits.



A. Prise en milieu d'enroulement.
B. Prises vers le neutre.
C. Prises vers la ligne.

Fig. 25 *a.*

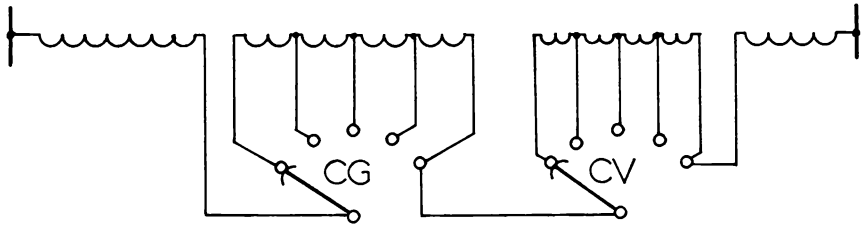


Fig. 25 *b.* CG. Commutateur de réglage grossier.
CV. Vernier de réglage fin.

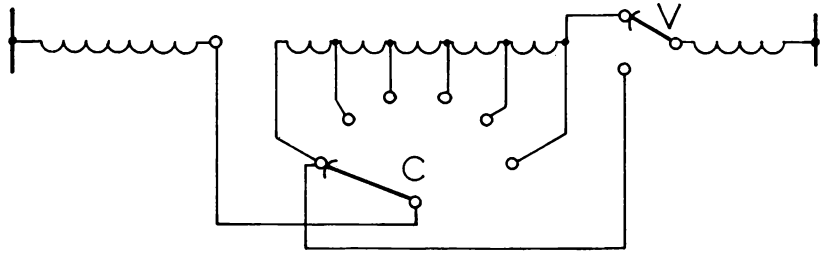


Fig. 25 *c.*
C. Commutateur.
V. Inverseur.

2.323. Schémas de couplage (1).

◆ **Modes de connexions.**

Les connexions couramment utilisées ont été codifiées par l'U.T.E. Le tableau IV et la *figure* 26 indiquent les cas les plus courants et les symboles correspondants. Les lettres majuscules repèrent les enroulements à haute tension et les lettres minuscules sont affectées aux enroulements à basse tension.

◆ **Indice horaire de couplage.**

Le déphasage des tensions entre bornes homologues de deux enroulements résulte des dispositions constructives du transformateur : sens relatif du bobinage, sens relatif des connexions aux bornes et, pour les enroulements polyphasés, modes de connexion des phases.

Ce déphasage est repéré par l'indice numérique ou indice horaire de couplage. Pour obtenir cet indice, on figure au centre d'un cadran d'horloge le potentiel du point neutre réel ou fictif de l'enroulement à la plus haute tension et l'on trace à partir de ce point les vecteurs rayonnants qui représentent les forces électromotrices étoilées des diverses bornes de cet enroulement, de telle sorte que le vecteur correspondant à une borne telle que A coïncide avec midi et que les vecteurs correspondant aux bornes B, C, D se suivent dans l'ordre des chiffres du cadran. On figure sur le même cadran, en faisant toujours coïncider le point neutre réel ou fictif avec le centre du cadran, le vecteur qui représente la force électromotrice étoilée apparaissant à la borne a (homologue de A) d'un autre enroulement ; l'heure indiquée par ce vecteur donne par définition l'indice numérique de cet enroulement.

Chacun des symboles littéraux relatifs aux enroulements secondaires ou tertiaires est suivi de l'indice numérique correspondant.

EXEMPLE : *Le symbole* Yn (*d* 11) *y* 0 *désigne un transformateur ayant un enroulement à haute tension en étoile, avec neutre sorti, un enroulement tertiaire à tension intermédiaire en triangle avec déphasage de* 330° *de la phase a par rapport à la phase A dans le sens de A vers B et un enroulement à plus basse tension en étoile avec déphasage nul.*

Observations.

1° L'indice indique que les f.é.m. entre bornes de l'enroulement à basse tension sont déphasées par rapport aux f.é.m. entre bornes homologues de l'enroulement à haute tension d'un angle compté dans le sens de A vers B et égal au produit de l'indice par 30°.

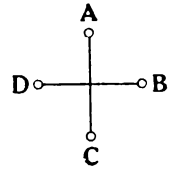
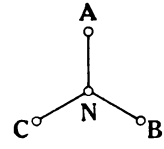
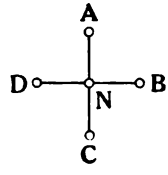
2° Un indice *i* correspond à un retard *i* x 30° des tensions entre bornes de l'enroulement basse tension par rapport aux tensions entre bornes homologues

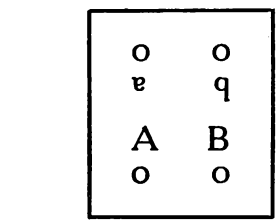
(1) Ce paragraphe reproduit partiellement le texte de la norme C 52.100 relative aux transformateurs.

TABLEAU IV.

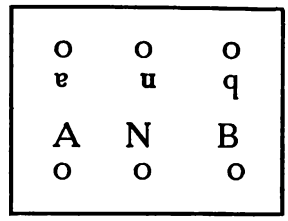
(Extrait norme C 52-150).

Lettres employées pour le repérage des bornes.

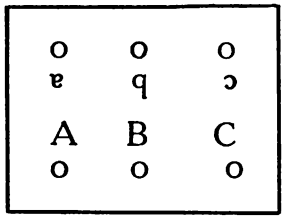
Transformateur	Lettres repérant les bornes
Monophasé	
Monophasé avec point milieu sorti	
Diphasé	
Triphasé avec neutre sorti	
Tétraphasé (diphasé 5 bornes)	



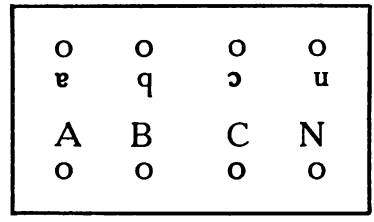
Monophasé
2 bornes



Monophasé
2 bornes + point milieu



Triphasé
3 bornes



Triphasé
3 bornes + neutre

Fig. 26.

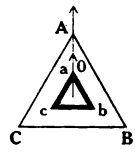
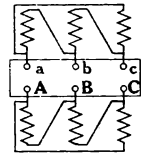
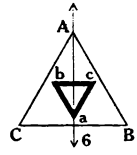
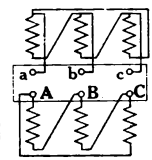
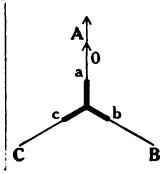
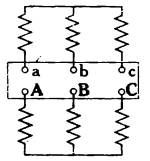
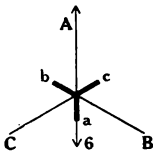
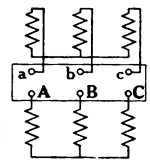
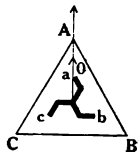
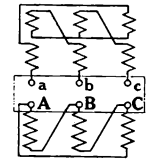
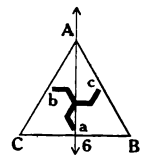
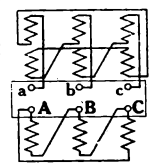
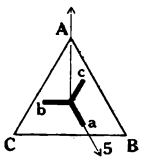
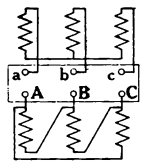
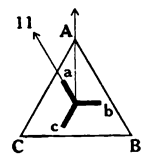
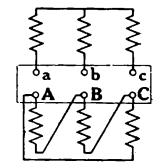
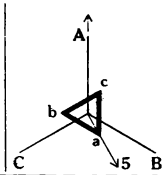
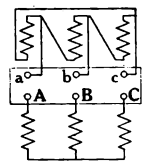
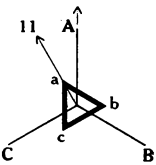
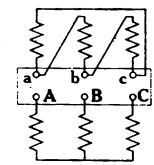
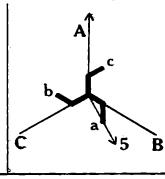
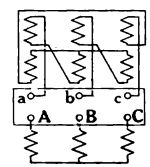
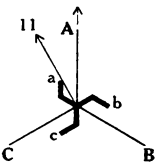
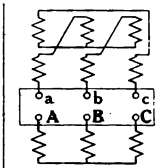
de l'enroulement haute tension lorsque le vecteur représentant le champ tourne dans le sens A, B, C ; il correspond à une avance de i x 30° lorsque le champ tourne dans le sens A, C, B.

3° On augmente ou on diminue de 6 l'indice du symbole de couplage lorsqu'on change le sens de bobinage ou que l'on permute les entrées et les sorties d'un des enroulements.

◆ **Couplages principaux des transformateurs triphasés à deux enroulements.**

Ils figurent sur le tableau IV *bis* ainsi que les schémas qui leur correspondent.

TABLEAU IV bis.
(extrait de la norme C 52-100).
Couplages usuels, d'indices 0, 5, 6, 11, des transformateurs triphasés.

Symbole	U.S.E. C 4 1930	Diagramme vectoriel	Schéma des connexions	Symbole	U.S.E. C 4 1930	Diagramme vectoriel	Schéma des connexions
Dd0 (0°)	G 11			Dd6 (180°)	G 21		
Yy0 (0°)	G 12			Yy6 (180°)	G 22		
Dz0 (0°)	G 13			Dz6 (180°)	G 23		
Dy5 (150°)	G 41			**Dy11** (330°)	G 31		
Yd5 (150°)	G 42			**Yd11** (330°)	G 32		
Yz5 (150°)	G 43			**Yz11** (330°)	G 33		

Nota. — Les schémas sont tracés en admettant que les enroulements ont le même sens relatif de bobinage.
Les symboles des couplages normaux sont indiqués en lettres grasses.

◆ **Possibilité de marche en parallèle des transformateurs de couplages différents.**

Quand la marche en parallèle est imposée entre plusieurs transformateurs, le déphasage à vide entre haute et basse tensions doit être le même pour tous les appareils.

Dans le cas des appareils triphasés, les différents couplages usités peuvent être classés en ce qui concerne la marche en parallèle en quatre groupes :

Groupe I : Couplages d'indice 0 - 4 - 8 ;

Groupe II : Couplages d'indices 6 - 10 - 2 ;

Groupe III : Couplages d'indices 1 - 5 ;

Groupe IV : Couplages d'indices 7 - 11.

Les appareils appartenant à un même groupe peuvent toujours fonctionner en parallèle :

— pour les appareils ayant le même indice de couplage, en connectant ensemble les bornes marquées de la même lettre tant sur la haute que sur la basse tension ;

— pour tous les appareils dont les indices diffèrent de 4 ou d'un multiple de 4, en connectant ensemble d'un côté (haute ou basse tension) les bornes marquées de la même lettre, et en reliant de l'autre côté des couples de bornes non homologues se déduisant les unes des autres par permutation circulaire.

Les appareils appartenant au groupe III peuvent être montés en parallèle avec ceux du groupe IV en changeant l'ordre de succession des phases sur l'un des groupes par un croisement de connexions de deux phases effectué à la fois du côté haute tension et du côté basse tension, opération suivie éventuellement d'une permutation circulaire d'un côté seulement.

Les appareils appartenant à des groupes différents sauf ceux des groupes III et IV montés suivant les indications précédentes ne peuvent être montés en parallèle.

La *figure* 27 indique dans tous les cas où la marche en parallèle est possible, les connexions à réaliser.

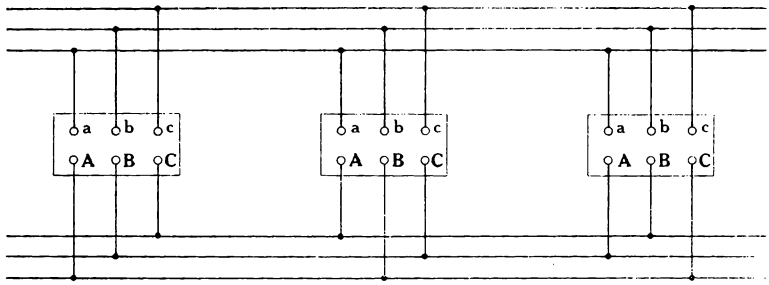
◆ **Détermination expérimentale des indices horaires.**

Deux méthodes sont préconisées par l'U.T.E.

— *Vérification en courant continu.* On applique entre deux des bornes a et b, par exemple, de l'un des enroulements, une différence de potentiel continue U de valeur convenable, en notant à laquelle de ces deux bornes est connecté le pôle positif de la source.

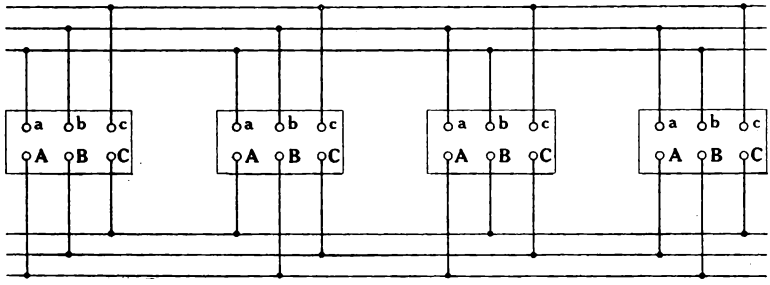
On branche d'autre part entre deux des bornes A, B, C de l'autre enroulement un voltmètre gradué de part et d'autre du zéro. On note le sens de la déviation de ce voltmètre à la fermeture de la source continue sur l'enroulement alimenté. A chaque indice horaire correspond une distribution caractéristique des

Connexions à réaliser pour mise en parallèle de transformateurs appartenant à un même groupe de couplage I, II, III ou IV.



Groupe I :	Indice 0	Indice 4	Indice 8
Groupe II :	Indice 6	Indice 10	Indice 2
Groupe III :	Indice 1	Indice 5	
Groupe IV :	Indice 7	Indice 11	

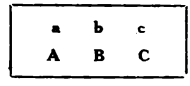
Connexions à réaliser pour mise en parallèle de transformateurs appartenant au groupe III et au groupe IV.



Groupe III — Groupe IV

Indice 1 — Indice 5 — Indice 7 — Indice 11

NOTA. — Les transformateurs apparaissent sur les figures dans la position :



Ils peuvent aussi tous se présenter dans la position :

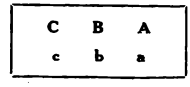


Fig. 27.

TABLEAU V.

Vérification, en courant continu, de l'indice horaire de couplage d'un transformateur.

Transformateurs	Polarités obtenues entre paires de bornes (1)						Indice horaire de couplage N
	A B		A C		B C		
	Borne A	Borne B	Borne A	Borne C	Borne B	Borne C	
Monophasés	+	—					0
	—	+					6
Triphasés	+	—	+	—	—	+	0
	+	—	+	—	0	0	1
	+	—	+	—	+	—	2
	0	0	+	—	+	—	3
	—	+	+	—	+	—	4
	—	+	0	0	+	—	5
	—	+	—	+	+	—	6
	—	+	—	+	0	0	7
	—	+	—	+	—	+	8
	0	0	—	+	—	+	9
	+	—	—	+	—	+	10
	+	—	0	0	—	+	11

(1) Les polarités indiquées dans cette colonne sont celles qui apparaissent aux bornes à haute tension au moment où on connecte une source de tension continue entre les bornes a et b de l'enroulement à basse tension, la borne a étant reliée au pôle positif de la source et la borne b au pôle négatif.

TABLEAU VI.

Vérification, en courant alternatif, de l'indice horaire de couplage d'un transformateur.

Indice horaire	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{U_{AB}}{U_{ab} \cos (U_{AB}\ U_{ab})}$	$+ R$	$+\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$+2R$	∞	$-2R$	$-\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$- R$	$-\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$-2R$	∞	$+2R$	$+\frac{2R}{\sqrt{3}}$
$\frac{U_{AB}}{U_{ac} \cos (U_{AB}\ U_{ac})}$	$+2R$	∞	$-2R$	$-\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$- R$	$-\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$-2R$	∞	$+2R$	$+\frac{2R}{\sqrt{3}}$	$+ R$	$+\frac{2R}{\sqrt{3}}$

NOTA. — R indique le rapport de transformation défini par le rapport de la tension entre bornes de l'enroulement à plus haute tension à la tension entre bornes de l'enroulement à plus basse tension.

polarités obtenues, ce qui permet une vérification de l'indice. Ces distributions de polarité sont données dans le tableau V dans l'hypothèse où la tension continue est appliquée entre les bornes a et b de l'enroulement basse tension, le pôle positif étant relié à la borne a et le pôle négatif à la borne b.

— *Vérification en courant alternatif.* On utilise un pont potentiométrique donnant à l'équilibre le rapport $\frac{U_{AB}}{U_{ab} \cos (U_{AB}\, U_{ab})}$ puis le rapport $\frac{U_{AB}}{U_{ac} \cos (U_{AB}\, U_{ac})}$ en grandeur et en signe (le signe négatif est indiqué par l'obligation dans laquelle on est d'inverser un des circuits). Les bornes A, B, C de la haute tension étant alimentées par un système de tensions triphasé équilibré, les différentes valeurs des rapports définis varient en fonction de l'indice horaire, suivant les indications contenues dans le tableau VI.

2.4. — SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT

Nous avons déjà exposé sommairement les lois de l'échauffement et du refroidissement qui sont valables pour toutes les machines électriques. Remarquons simplement que le transformateur, à l'inverse des machines tournantes, ne comporte pas d'auto-ventilation et que, de ce fait, les constantes de temps d'échauffement et de refroidissement sont les mêmes.

2.41. — DIFFÉRENTS TYPES DE REFROIDISSEMENT

Ils sont indiqués dans le tableau VII extrait de la norme U.T.E. C 51-100.

L'U.T.E. a également normalisé les échauffements limites pour différentes classes d'isolement et divers modes de refroidissement (*Tableau* VIII).

Nous allons examiner rapidement les caractères particuliers propres à chaque type de refroidissement.

2.411. Refroidissement naturel (SN) des transformateurs secs.

Le refroidissement naturel (SN) s'applique aux petits transformateurs à basse tension jusqu'à quelques dizaines de kVA (transformateurs de sécurité et d'isolement, transformateurs pour redresseurs, autotransformateurs pour démarrage de moteurs...).

TABLEAU VII. — *Modes de refroidissement usuels.*

Transformateurs	Fluide de refroidissement	Circulation du liquide d'immersion	Renouvellement du fluide de refroidissement	Symbole	Observations
Secs	Air	»	Naturel	SN	
—	—	»	Forcé	SV	
Immergés	—	Naturelle	Naturel	IN	(1)
—	—	Naturelle	Forcé	IV	(1) (2)
—	—	Forcée dans batterie de radiateurs indépendants	Naturel	IFN	
—	—	Forcée dans batterie de radiateurs indépendants	Forcé	IFV	(2)
—	—	Forcée dans aéroréfrigérant	Forcé	IFA	(2) (3)
—	Eau	Naturelle	Forcé dans serpentin placé dans la cuve	IE	(2)
—	—	Forcée dans réfrigérant séparé	Forcé	IFE	(2)

(1) Les transformateurs IN et IV peuvent être réalisés à cuves lisses ou ondulées ou avec tubes ou radiateurs fixés aux parois, ou encore avec batterie séparée de radiateurs reliée à la cuve par une canalisation.

(2) Les transformateurs IV et IFV peuvent généralement assurer un service continu à charge réduite avec ventilation arrêtée ; les transformateurs à aérofrigérant IFA et les appareils à circulation d'eau IE et IFE ne peuvent pas en principe fonctionner avec ventilation ou circulation d'eau arrêtées.

(3) Un aéroréfrigérant est constitué par un ventilateur et des éléments de radiation (tubes à ailettes), formant un ensemble compact dont le pouvoir réfrigérant n'est appréciable que lorsque le ventilateur est en service.

TABLEAU VIII. — Valeurs limites d'échauffement en degrés Celsius.

N° de référence	Organes	Procédé de mesure (1)	Isolants			
			Classe O	Classe A	Classe E	Classe B
	Transformateurs non immergés dans un liquide isolant.					
1	Enroulements en une seule couche	R	45	60	75	85
2	Enroulements imprégnés à cœur.....	R		60	75	
3	Tous autres enroulements	R	40	55	70	80
4	Tôles magnétiques :					
	a) en contact direct avec les enroulements	T	même valeur que pour les enroulements valeurs limitées par leur effet sur les parties isolantes.			
	b) non en contact direct avec les enroulements isolés....	T				
	Transformateurs immergés dans un liquide isolant.					
5	Tous enroulements	R	60			
6	Tôles magnétiques	I	70			
7	Huile isolante en contact avec l'air.....	T (2)	50 (3)			
8	Huile isolante avec matelas de gaz inerte	T (2)	55			
9	Liquide isolant autre que l'huile		(4)			
	Transformateurs immergés dans un liquide isolant avec circulation forcée du liquide dans un réfrigérant indépendant.					
10	Tous enroulements	R	65			
11	Tôles magnétiques	I	75			
12	Huile isolante en contact avec l'air.....	T (2)	50 (3)			
13	Huile isolante avec matelas de gaz inerte	T (2)	55			
14	Liquide isolant autre que l'huile		(4)			

NOTA. — Aucune limite d'échauffement n'est fixée pour les isolants de la classe C.

(1) R = par variation de résistance ; T = par thermomètre ; I = par indicateur de température placé à la surface des tôles.

(2) Mesure effectuée aussi près que possible de la surface supérieure de l'huile dans la cuve de l'appareil.

(3) Dans le cas d'emploi d'un conservateur d'huile, la limite d'échauffement doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur ; sauf spécification contraire, elle est de 55 °C.

(4) L'échauffement du liquide isolant autre que l'huile minérale naturelle doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

La chaleur est évacuée par rayonnement et convection naturels. Il est donc important de ne pas gêner ces phénomènes en disposant, par exemple, des écrans qui s'opposent aux mouvements de convection. La quantité de chaleur, qui peut être évacuée par unité de surface est limitée ; elle est l'ordre de 0.1 W/cm^2 pour un échauffement de 80 °C. Certains petits transformateurs peuvent être noyés dans une cuve remplie de brai ou autre matière facilement fusible.

Dans le type SV, un ventilateur est disposé de façon à souffler de l'air sur les enroulements, ce qui permet d'augmenter la quantité de chaleur extraite par convection.

2.412. Refroidissement des transformateurs immergés.

Ce mode de refroidissement est de loin le plus courant. L'appareil est installé dans une cuve métallique remplie d'un liquide isolant (huile ou diélectrique chloré) (1).

Cette construction, outre le refroidissement, soustrait le transformateur au milieu ambiant et le préserve des poussières, des variations hygrométriques, des vapeurs corrosives. Afin d'éviter les inconvénients résultant de la capacité entre le circuit magnétique et la cuve, ces deux éléments sont réunis par une liaison électrique (mise à la masse du circuit).

◆ **Refroidissement naturel (IN).**

La différence de température entre les couches supérieures et inférieures du liquide provoque des mouvements de convection qui assurent l'évacuation des pertes sur les parois. Pour augmenter la surface des parois, on a recours à l'un des moyens suivants :

— *Cuve à flancs ondulés jusque vers* 2 000 *à* 3 000 *kVA* (*fig.* 28) ;

— *Faisceaux de tubes rapportés sur la cuve et dans lesquels le liquide circule par thermo-siphon* (*fig.* 29) ;

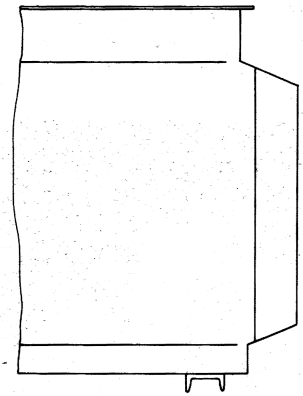
— *Radiateurs à faisceaux tubulaires jusqu'à* 10 000 *à* 12 000 *kVA* (*fig.* 30).

Ce mode de refroidissement est d'une grande sécurité et très économique. Le transformateur démuni de tout appareil auxiliaire est entièrement autonome.

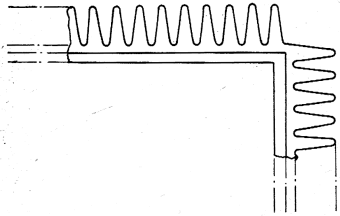
◆ **Refroidissement par soufflage des radiateurs** (IV) (*fig.* 31).

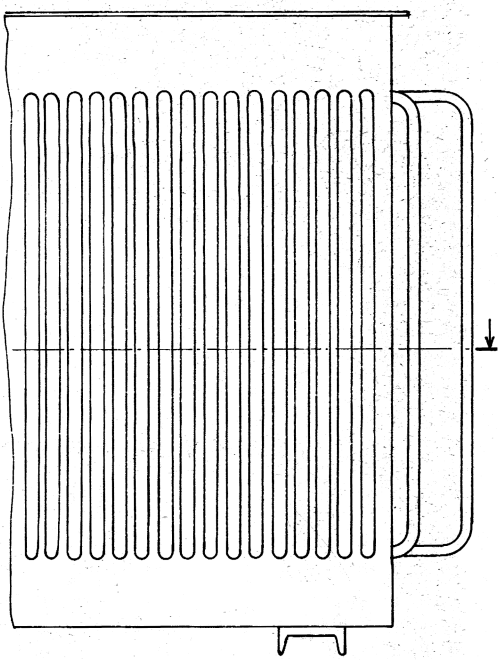
Un ventilateur disposé devant les radiateurs souffle de l'air. L'échange de chaleur entre liquide et radiateur est amélioré, ce qui permet de diminuer la surface d'échange ; mais, pour éviter des écarts de température importants, la section des tubes doit être plus grande que dans le cas du refroidissement naturel.

(1) Voir tome 4 : Etude des matériaux.



← *Fig.* 28.





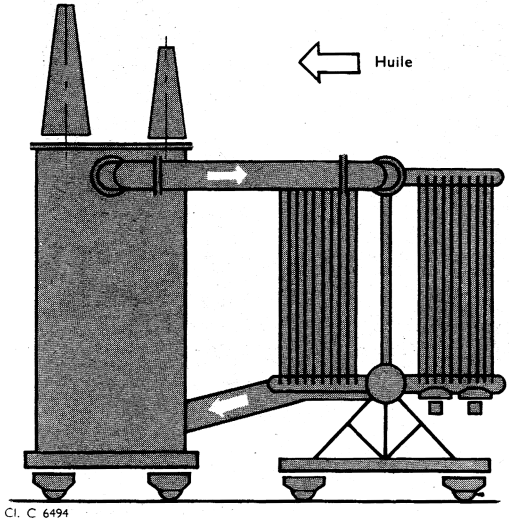


Fig. 30.

Schéma de circulation de l'huile dans une batterie de radiateurs séparée à refroidissement naturel.

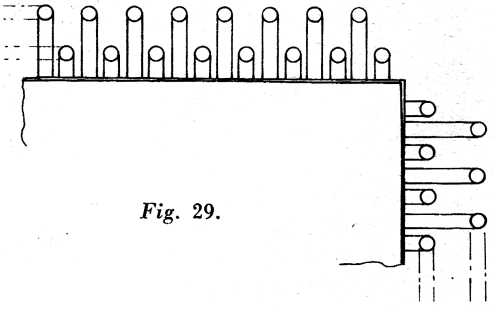
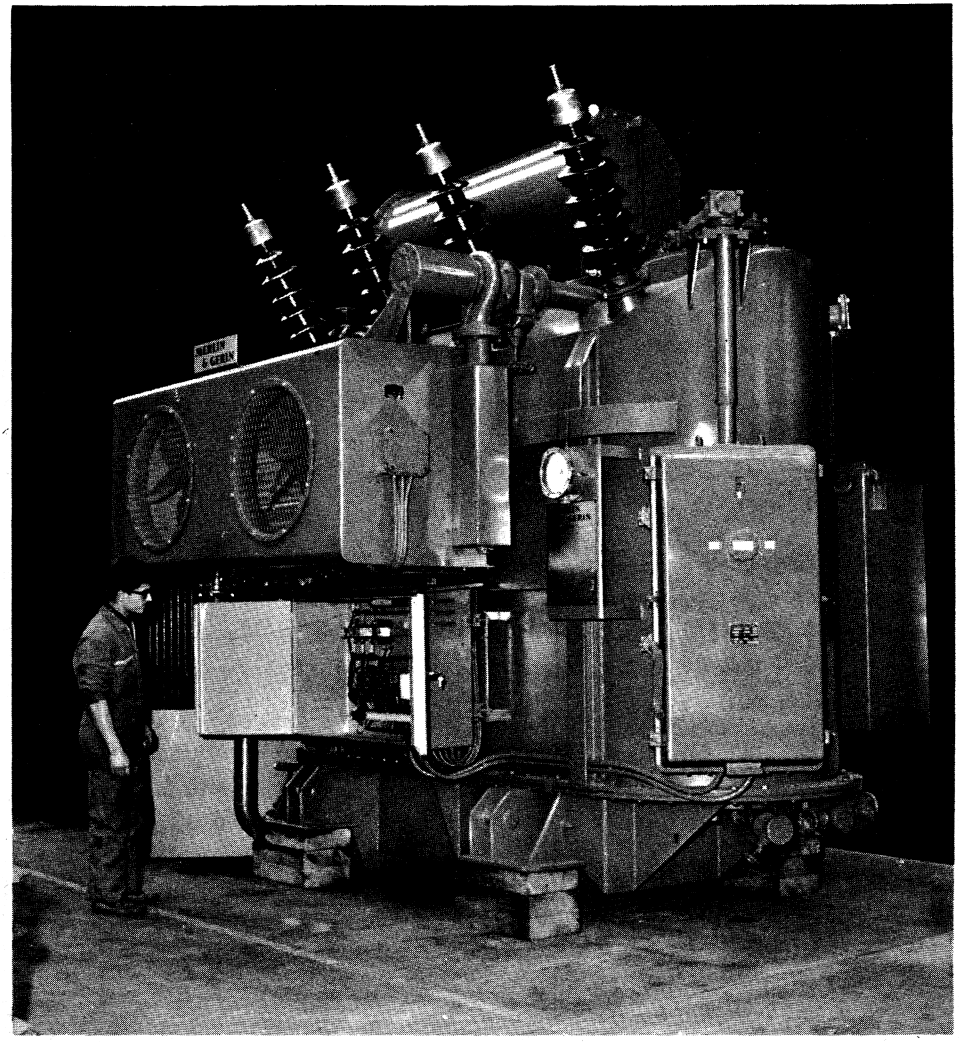


Fig. 29.

Le fonctionnement sans ventilateur est possible pour les charges partielles. Ce n'est qu'à partir des deux tiers environ de la charge nominale que les ventilateurs, asservis à la température de l'huile, sont mis en action. On peut reprocher



(Document Merlin-Gerin.)

Fig. 31.

à ce dispositif l'installation assez complexe des ventilateurs et l'obligation de disposer les radiateurs près des cuves afin de ne pas entraver l'effet de thermosiphon ; de plus, le fonctionnement peut être bruyant.

◆ **Refroidissement par circulation forcée du liquide.**

La circulation de l'huile est assurée par un groupe moto-pompe immergé. Jusqu'aux deux tiers de la charge nominale la circulation naturelle du liquide dans les radiateurs suffit pour assurer le refroidissement. Le fonctionnement de la pompe est asservi à la température du liquide. Un système de clapet et by-pass autorise le passage du liquide, en dehors de la pompe, lorsque celle-ci n'est pas en service.

Cette disposition permet d'éloigner le transformateur et les radiateurs et de les séparer par des murs coupe-feu. Habituellement, pour éviter les inconvénients dus à une panne de pompe, on dispose deux groupes de radiateurs indépendants et alimentés chacun par une pompe. La circulation intense du liquide assure un refroidissement efficace et uniforme et permet des surcharges élevées.

Les radiateurs peuvent être à refroidissement naturel (IFN) ou soufflés (IFV).

On peut remplacer les radiateurs par des aéro-réfrigérants (IFA) constitués par des tubes munies d'ailettes et sur lesquels des ventilateurs soufflent de l'air. Ce dispositif efficace présente cependant le gros inconvénient d'être à peu près complètement inutilisable en cas de panne sur la pompe ou sur le ventilateur, et il pose des problèmes de bruit (*fig.* 31).

◆ **Refroidissement par circulation d'eau.**

Le dispositif le plus simple consiste à noyer un serpentin d'eau dans les couches supérieures du liquide (IE). Très employés dans le passé, ces systèmes ont été pratiquement abandonnés. L'eau circule dans le serpentin à une pression plus élevée que celle de l'huile ; il en résulte un risque d'accidents graves en cas de fuite. Pour les tensions élevées, il faut augmenter sérieusement les distances d'isolement entre le bobinage et la cuve. De plus, en cas d'impuretés dans l'eau, l'encrassage est rapide et le nettoyage quasi impossible.

Actuellement, on emploie, de préférence, le refroidissement par circulation forcée de l'huile dans un réfrigérant séparé, refroidi lui-même par circulation d'eau (IFE). La circulation de l'huile est assurée par une pompe qui maintient une surpression par rapport à l'eau. Le réfrigérant, constitué par des tubes en cuivre à ailettes, est placé dans une cuve séparée. Les courants d'huile et d'eau la parcourent en sens inverse.

Ce mode de refroidissement, très efficace, autorise des surcharges importantes, et il est silencieux. Il exige par contre une assez grande quantité d'eau peu chargée en calcaire ; on admet un débit de 1 litre d'eau à 15 °C par kilowatt de pertes et par minute. Il doit également fonctionner en permanence (*fig.* 32).

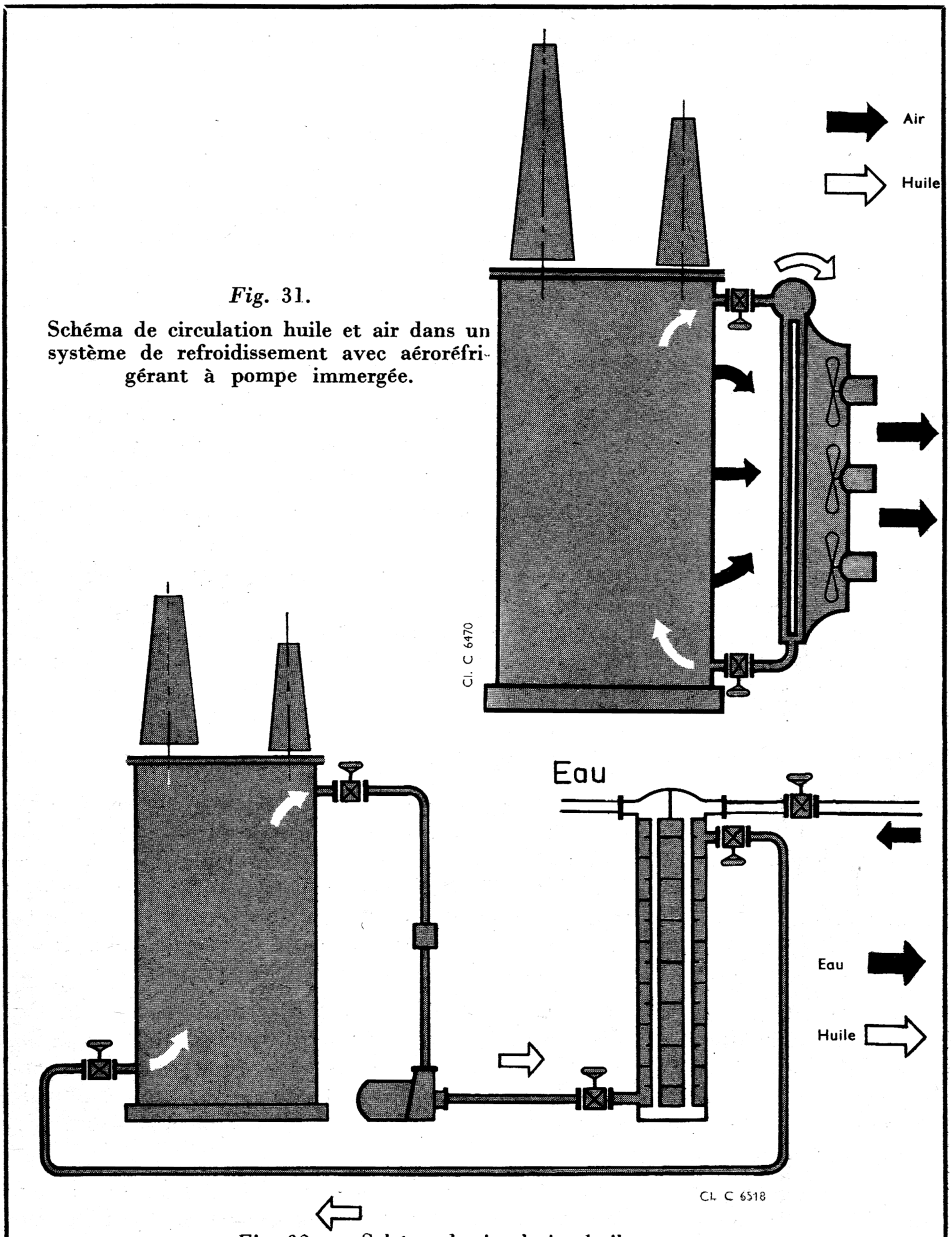


Fig. 31.
Schéma de circulation huile et air dans un système de refroidissement avec aéroréfrigérant à pompe immergée.

Fig. 32. — Schéma de circulation huile et eau dans un système de refroidissement par hydroréfrigérant.

◆ **Refroidissement par quartz** (*fig.* 33).

Certains transformateurs sont noyés dans du sable quartzeux. Le quartz possède la meilleure conductivité thermique des isolants solides (0,1 W/cm/°C) ; il s'oppose à la propagation des flammes et absorbe tous les dégagements de fumée. Complètement inaltérable, il supprime tout entretien. Ces qualités l'ont fait adopter chaque fois qu'une sécurité absolue est recherchée : magasins, lieux publics, mines.

L'absence de mouvements de convection est compensée par des écrans métalliques reliés au noyau magnétique et destinés à conduire la chaleur jusqu'à la cuve.

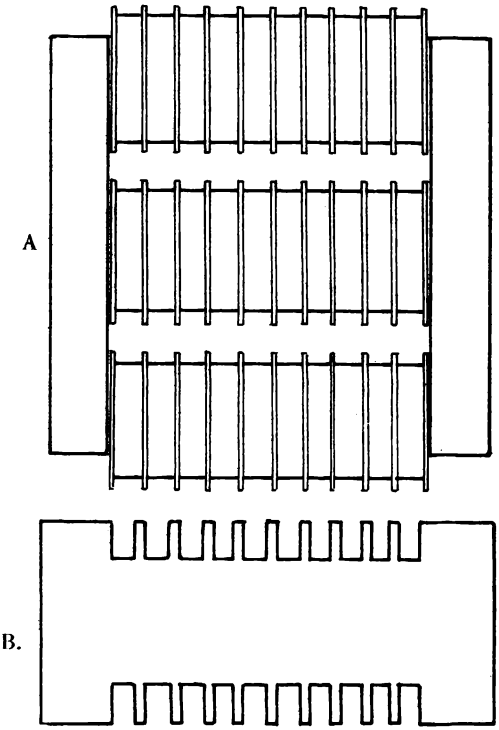


Fig. 33.

A. Transformateur non encuvé. Remarquer la position horizontale des colonnes et les écrans entre bobines élémentaires.

B. Cuve vue de dessus. Les ailettes de la cuve reçoivent les écrans.

◆ **Refroidissement par gaz.**

Des essais sont entrepris pour substituer des gaz aux liquides. Les résultats obtenus avec l'hexafluorure de soufre (SF_5) ont permis de l'utiliser dans des cas spéciaux (locomotives électriques). Sa rigidité diélectrique, deux ou trois fois plus élevée que celle de l'air, permet de diminuer les distances d'isolement. La pression du gaz peut atteindre 4 bar (1).

Les isolants des classes F et H, convenablement choisis, peuvent être utilisés. Le refroidissement est du type naturel ou forcé. Dans ce dernier cas, le gaz comprimé circule à travers un échangeur extérieur à circulation d'air.

Par rapport au refroidissement à liquide, on note un gain de poids, un bruit de fonctionnement moins accusé et une plus grande sécurité due à ce qu'un arc interne ne peut pas provoquer d'explosion.

Des essais ont été également effectués avec du propane perfluoré (C_3F_8).

2.5. — TRAVERSÉES

La liaison du bobinage aux bornes extérieures s'effectue à travers le couvercle ou la cuve par des traversées isolantes appelées aussi quelquefois « porcelaines ».

Dans les cas les plus simples, une traversée comprend :

— une *tige métallique* reliée d'une part au bobinage, d'autre part au réseau ;

— un *manchon isolant* en porcelaine.

La surface extérieure est lisse pour les appareils intérieurs et munie de jupes ou de cannelures pour les appareils extérieurs. L'espace entre manchon et tige centrale est rempli d'air ou huile (*fig.* 34).

La répartition du champ électrique entre le conducteur central et les parties métalliques n'est linéaire, ni dans le sens radial, ni superficiellement. Le gradient de potentiel augmente fortement vers le collier de fixation. Pour éviter les aigrettes, il est nécessaire de donner une épaisseur à l'isolant beaucoup trop importante.

On améliore la répartition du gradient de potentiel radial et superficiel en introduisant dans l'isolant des armatures métalliques, formant des surfaces équipotentielles (A, *fig.* 35). En jouant sur la hauteur des électrodes et sur leur écartement, on arrive à un gradient de potentiel superficiel constant. Le gradient de potentiel radial est variable et atteint sa valeur minimale au centre de l'isolant. L'isolant est constitué par du papier imprégné enroulé. L'ensemble, recouvert d'un manchon de porcelaine, est appelé traversée condensateur (*fig.* 35).

La fixation des traversées s'effectue sur le couvercle par des brides et des joints d'étanchéité.

La figure 36 représente une enveloppe pour traversée de 345 kV.

(1) Soit 40 N/cm² ou 0,4 MPa.

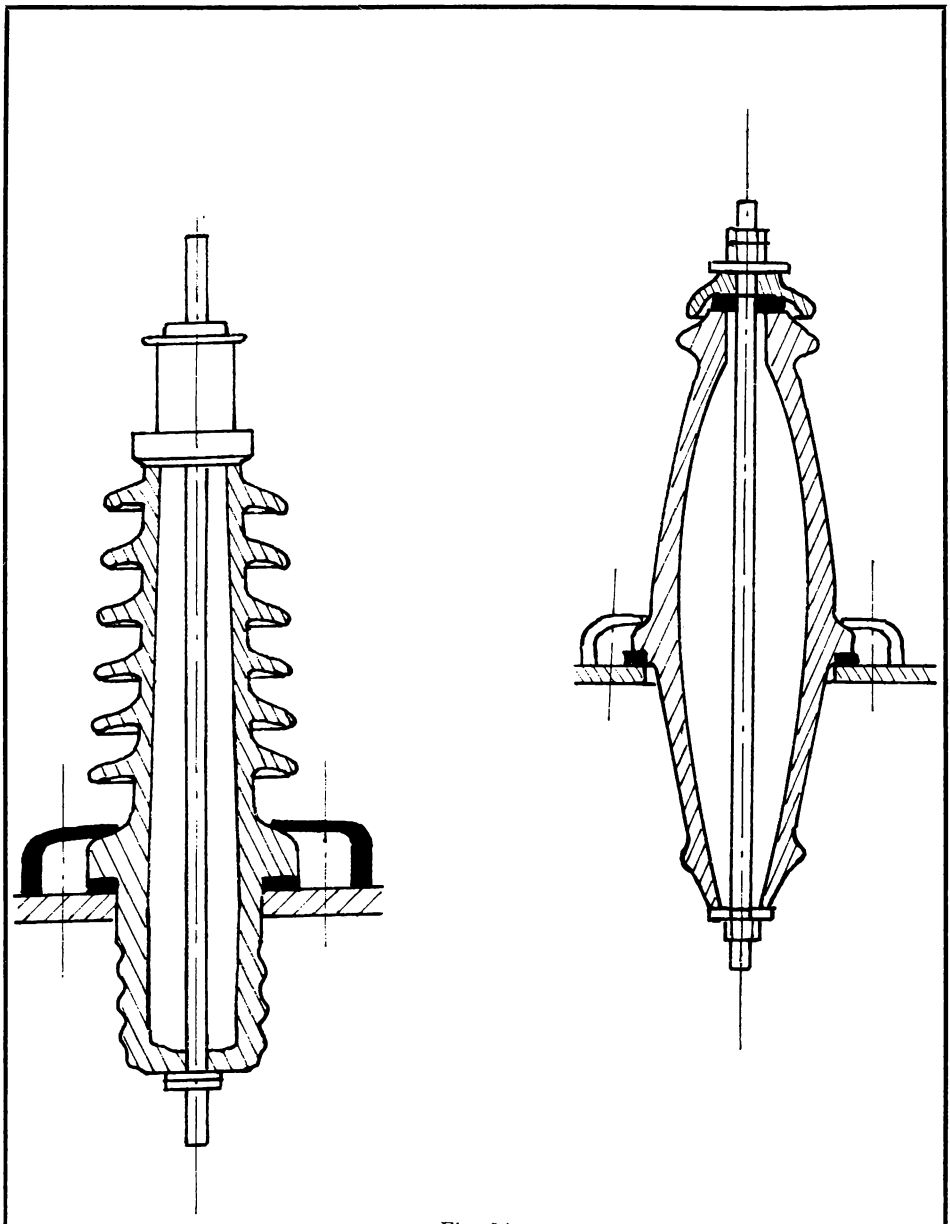


Fig. 34.

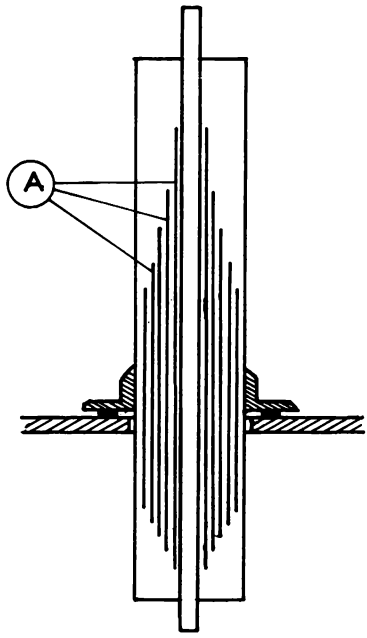
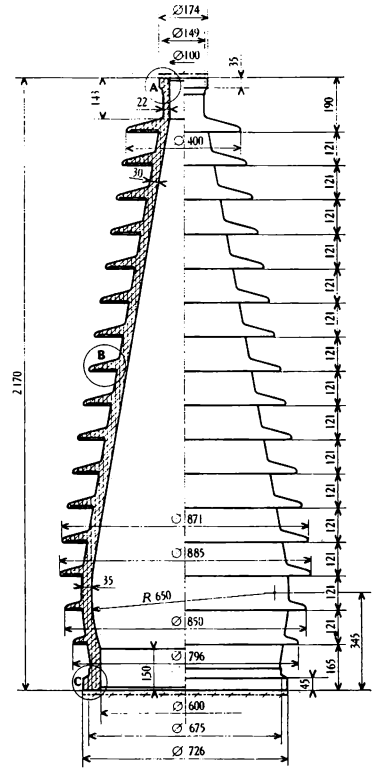


Fig. 35.

A - Armatures.



(Document U.T.E.)

Fig. 36.

2.6. — ORGANES DIVERS

En plus des organes essentiels que nous venons d'examiner, et qui se retrouvent sur toutes les machines, un transformateur peut recevoir des organes plus ou moins secondaires très divers : conservateur d'huile, matelas d'azote, vannes de vidange ou de filtrage, éclateurs sur bornes, assécheur d'air, thermomètre, thermostat à alarme, relais Buccholz, galets de roulement, boîte à câbles, relais thermique, image thermique...

2.61. — CONSERVATEUR D'HUILE OU « BALLONNET ».

Afin de compenser les variations du niveau d'huile sous l'effet des écarts de température, une réserve est assurée par un réservoir en charge par rapport à la cuve. Le relais Buccholz, s'il existe, est installé dans la tubulure horizontale reliant le conservateur à la cuve.

Le réservoir est muni d'un tube de respiration et d'un niveau. Le respirateur, en établissant une communication permanente entre le diélectrique et l'atmosphère, évite les condensations intérieures. Si l'air est très humide, il est possible de compléter le respirateur par un *assécheur* contenant du chlorure de calcium renouvelé périodiquement. On peut aussi utiliser du gel de silice additionné de gel de cobalt qui change de couleur lorsqu'il s'humidifie. Il suffit alors de le chauffer vers 80 °C pour en extraire l'humidité et le régénérer (*fig.* 37).

2.62. — MATELAS D'AZOTE

L'huile, en contact avec l'air, s'oxyde et perd peu à peu ses propriétés initiales. On peut remédier à cet inconvénient en disposant au-dessus du liquide une couche d'azote. Le gaz est contenu dans un réservoir en caoutchouc qui se dilate ou se rétracte suivant les variations du volume de liquide (*fig.* 38).

2.63. — AUTRES ORGANES

Le relais Buccholz et l'image thermique sont étudiés dans le tome 3. Quant aux autres organes, leur nom seul suffit à les justifier.

2.7. — RENDEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Du point de vue électrotechnique, on considère que le maximum de rendement est atteint lorsqu'il y a égalité entre les pertes constantes (pertes fer) et les pertes variables (pertes cuivre).

Cette condition ne correspond pas nécessairement au fonctionnement le plus économique, ni au prix de revient le plus bas à la construction. Il faut tenir compte à la fois des temps de fonctionnement et des variations de charge.

Dans les transformateurs de distribution qui fonctionnent pendant une grande partie du temps à faible charge, on a intérêt à diminuer les pertes constantes. Les méthodes de calcul permettant d'obtenir la solution optimale font intervenir des impératifs techniques et les conditions financières (achat, exploitation, amortissement, capitalisation des pertes).

L'U.T.E. et l'E.D.F. imposent des caractéristiques qui tiennent compte des progrès techniques réalisés aussi bien dans l'élaboration des circuits magnétiques que dans les méthodes d'essais et de mesures.

A titre d'exemple, les tableaux IX et X extraits du catalogue d'un constructeur, indiquent les caractéristiques de quelques types de transformateurs.

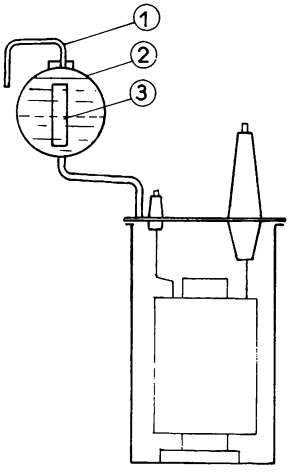
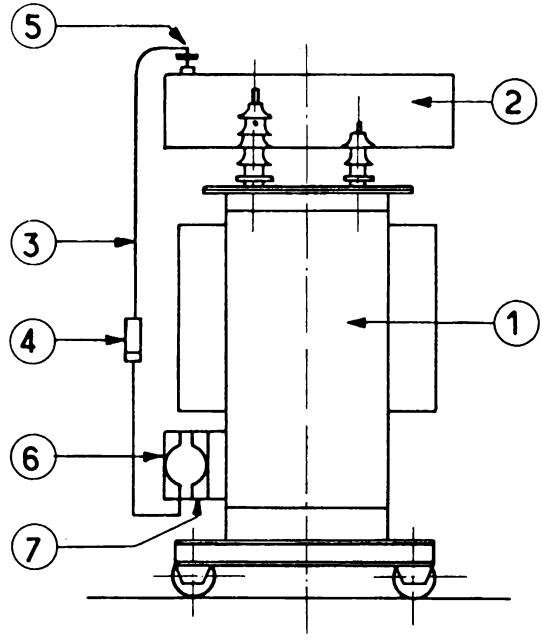


Fig. 37.

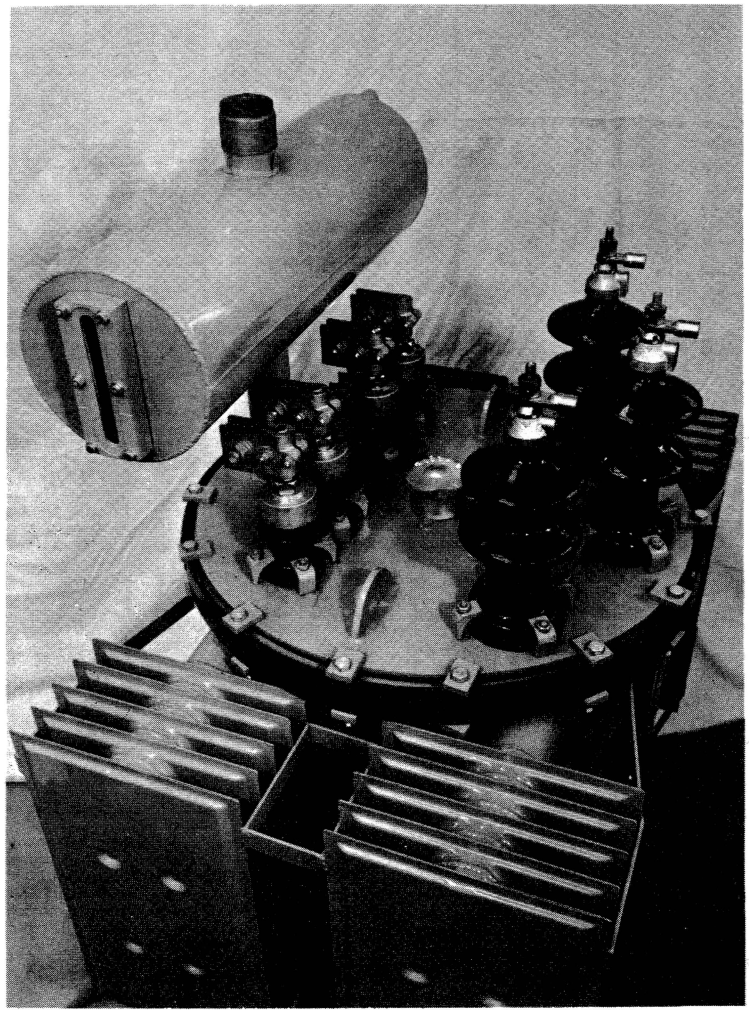
1. Respirateur.
2. Ballonnet.
3. Niveau d'huile.



(Document Jeumont.)

Fig. 38.

1. Transformateur à protéger.
2. Conservateur d'huile.
3. Conduite en acier (ou en plastique polyvinilique ou butyl pour les très petits appareils).
4. Dessicateur au gel de silice.
5. Valve d'admission d'azote.
6. Réservoir d'azote.
7. Caisson contenant le réservoir d'azote.



(Document C.E.M.)

Fig. 39. — Transformateur de distribution.

Détails du couvercle. On remarque : le conservateur d'huile avec son bouchon de remplissage et le niveau d'huile ; au centre du couvercle, la poignée de manœuvre du commutateur de réglage à vide ; les brides de fixation des traversées ; le radiateur d'huile.

TABLEAU IX. — *Transformateurs triphasés de distribution 50 Hz - niveau d'isolement 36 kV.*

Tension normalisées :

HT, 30 kV.

BT, 230 et 398 volts à vide soit 220 et 380 volts en charge environ.

Caractéristiques électriques.

Puissance en kVA	GARANTIES												
	Pertes à vide en W	Pertes cuivre en W	Tension de C. Ct	RENDEMENTS								Chutes de tension à 4/4	
				cos φ = 1				cos φ = 0,8				cos φ = 1	cos φ = 0,8
				1/4	1/2	3/4	4/4	1/4	1/2	3/4	4/4		
	*Couplage Étoile Zigzag - neutre sorti												
25	160	800	4,5 %	96,5	97	96,6	96	95,6	96,2	95,75	95	3,25	4,5
40	220	1 170	4,5 %	96,95	97,3	97	96,35	96,2	96,6	96,2	95,5	3	4,4
63	300	1 640	4,5 %	97,4	97,7	97,35	96,85	96,8	97,1	96,7	96,05	2,7	4,3
80	360	1 980	4,5 %	97,6	97,85	97,55	97	97	97,3	96,9	96,25	2,55	4,25
100	425	2 340	4,5 %	97,65	97,9	97,6	97,15	97,05	97,4	97	96,4	2,45	4,2
125	515	2 790	4,5 %	97,7	98	97,7	97,3	97,1	97,5	97,1	96,6	2,35	4,15
160	600	3 330	4,5 %	97,9	98,15	97,9	97,45	97,35	97,65	97,35	96,8	2,15	4,1
	Couplage Triangle Etoile ou Etoile-Etoile - neutre sorti												
200	715	3 980	4,5 %	98,15	98,35	98,1	97,75	97,65	97,9	97,6	97,15	2,1	4
250	900	4 230	4,5 %	98,2	98,45	98,3	98	97,75	98,1	97,85	97,5	1,8	3,9
315	1 100	5 200	4,5 %	98,25	98,5	98,35	98,05	97,8	98,15	97,9	97,55	1,75	3,85
400	1 300	6 210	4,5 %	98,35	98,6	98,45	98,2	97,95	98,25	98,05	97,7	1,65	3,8
500	1 560	7 400	4,5 %	98,4	98,65	98,5	98,25	98	98,3	98,15	97,8	1,6	3,75
630	1 800	8 820	4,5 %	98,55	98,75	98,6	98,35	98,2	98,45	98,25	97,95	1,5	3,7

* Pour les puissances de 25 à 160 kVA, le couplage Étoile - Étoile entraîne une réduction des pertes cuivre de 6 % environ.

TABLEAU X. — *Transformateurs triphasés 50 Hz.*

Caractéristiques électriques

Haute tension nominale	Puissances en kVA	Basse tension volts	GARANTIES						
			Pertes à vide en kW	Pertes cuivre en kW	Tension de c.-circuit	Chutes de tension		Rendements	
						cos φ = 1	cos φ = 0,8	cos φ = 1	cos φ = 0,8
Jusqu'à 17,5 kV	800	230	1,95	12	5,5 %	1,63	4,40	98,28	97,85
		400	1,95	10,2	5 %	1,38	4,05	98,5	98,15
		5 500	1,95	9,5	5,5 %	1,33	4,23	98,6	98,25
	1 000	230	2,3	13,9	6 %	1,56	4,70	98,4	98
		400	2,3	12,1	5 %	1,33	3,93	98,6	98,25
		5 500	2,3	11,5	5,5 %	1,3	4,2	98,65	98,30
	1 250	230	2,7	17,5	6,5 %	1,6	5,02	98,4	98
		400	2,7	15	5,5 %	1,34	4,26	98,6	98,25
		5 500	2,7	14	5,5 %	1,26	4,2	98,7	98,35
	1 600	230	3,3	22,2	7,5 %	1,65	5,66	98,44	98,05
		400	3,3	18,1	6 %	1,30	4,52	98,7	98,35
		5 500	3,3	16,5	6,5 %	1,24	4,77	98,8	98,50
	2 000	400	3,9	22,5	7 %	1,36	5,15	98,7	98,35
		5 500	3,9	20	6,5 %	1,2	4,71	98,8	98,5
	2 500	400	4,5	28	7,5 %	1,39	5,47	98,75	98,44
		5 500	4,5	24	6,5 %	1,17	4,73	98,9	98,6
	3 150	5 500	5,4	29	7,5 %	1,2	5,35	98,92	98,65
	4 000	5 500	6,4	33,5	7,5 %	1,12	5,29	99	98,75

TABLEAU X *(suite)*.

Haute tension nominale	Puissances en kVA	Basse tension volts	GARANTIES						
			Pertes à vide en kW	Pertes cuivre en kW	Tension de c.-circuit	Chutes de tension		Rendements	
						cos φ = 1	cos φ = 0,8	cos φ = 1	cos φ = 0,8
De 17,5 kV à 35 kV	800	230	2,2	12,6	6 %	1,75	4,81	98,18	97,74
		400	2,2	10,8	5 %	1,44	4,20	98,28	97,86
		5 500	2,2	10	5,5 %	1,4	4,27	98,5	98,15
	1 000	230	2,5	14,4	6,5 %	1,64	5,05	98,35	97,95
		400	2,5	12,6	5,5 %	1,40	4,27	98,50	98,10
		5 500	2,5	12	5,5 %	1,34	4,24	98,55	98,2
	1 250	230	2,9	18	6,5 %	1,64	5,05	98,35	97,95
		400	2,9	15,5	6 %	1,41	4,59	98,55	98,2
		5 500	2,9	14,5	5,5 %	1,3	4,22	98,65	98,3
	1 600	230	3,5	22,7	7,5 %	1,68	5,66	98,40	98,01
		400	3,5	18,6	6,5 %	1,86	4,86	98,65	98,3
		5 500	3,5	17	6,5 %	1,27	4,8	98,7	98,4
	2 000	400	4,1	23	7 %	1,73	5,44	98,65	98,3
		5 500	4,1	20,5	6,5 %	1,33	4,77	98,8	98,45
	2 500	400	4,7	28,5	7,5 %	1,41	5,49	98 69	98,37
		5 500	4,7	24,5	6,5 %	1,19	4,74	98,85	98,55
	3 150	5 500	5,6	30	7,5 %	1,23	5,37	98,9	98,60
	4 000	5 500	6,7	34,5	7,5 %	1	5,1	99	98,75

2ME PARTIE

ETUDE DES SCHEMAS DE BOBINAGE

Il nous paraît utile d'avertir le lecteur que dans l'étude des machines, les raisonnements relatifs à l'établissement d'un schéma paraissent à première vue les plus complexes.

Cela provient certainement de ce qu'un schéma de bobinage fait intervenir simultanément plusieurs règles relevant, soit de nécessités électriques, soit de nécessités technologiques et que la non-application d'une seule de ces règles rend impossible, ou très aléatoire, le fonctionnement de la machine. Par ailleurs, s'il est possible de retenir la forme d'un organe matériel de machine, tout en en ignorant ses fonctions, il est absolument impossible de se fier uniquement à la mémoire et de retenir par cœur les différents schémas ; il est tout aussi impossible d'établir un schéma si l'on est incapable de définir toutes les conditions qu'il doit remplir.

Nous nous sommes efforcés de ramener l'établissement d'un schéma à l'application de quelques règles généralisées au plus grand nombre de schémas possible. Ce n'est que dans la mesure où ces règles seront bien assimilées que l'on pourra aborder l'étude des schémas complexes ou subtils. Nous engageons très fermement le lecteur à se munir d'un crayon et d'une feuille de papier et à refaire seul les différentes étapes que nous lui indiquerons.

Il ne faut pas trop chercher, dans l'étude qui va suivre, un recueil de recettes qu'il suffirait de lire et d'appliquer pour résoudre tous les schémas, ou un répertoire de schémas tout préparés. Il faut simplement y voir la tentative d'application de la méthode déjà utilisée dans les autres chapitres et qui veut qu'avant de décrire un organe ou une machine, il faut avoir défini entièrement, et le plus parfaitement possible, les fonctions qui lui sont demandées et les exigences de construction qui en découlent.

I. Conventions de représentation graphique et terminologie

Nous avons déjà défini certains termes employés en bobinage. En ce qui concerne la représentation graphique, les indications données dans les normes traitant des schémas ne concernent que de très loin les symboles relatifs au bobinage.

1.1. — REPRÉSENTATION DES CONDUCTEURS

En général, sur un schéma, on ne représente ni les noyaux magnétiques, s'il s'agit d'un enroulement sur pôle saillant, ni les encoches dans lesquelles se logent les fils.

De même, pour simplifier l'exécution et rendre plus claire la lecture d'un schéma, on représente par un seul trait l'ensemble des conducteurs d'un faisceau.

Ainsi, une bobine formée de 50 spires en série sera représentée par un trait, que les spires soient formées par un seul fil ou par plusieurs fils en parallèle (*fig.* 1).

S'il n'y a aucun danger de confusion, on pousse même la simplification jusqu'à supprimer complètement le chignon du côté des connexions (*fig.* 2).

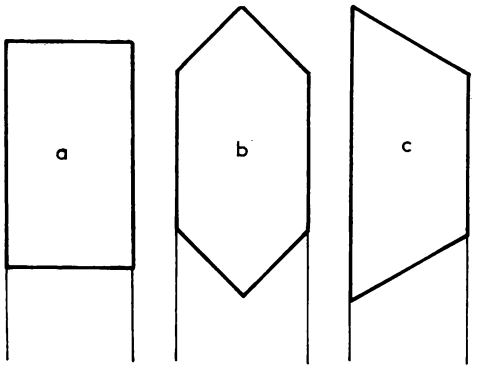


Fig. 1.

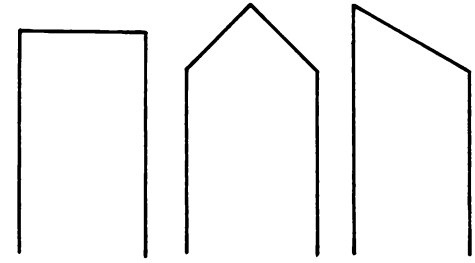


Fig. 2.

a. Bobine pour bobinage à plans.
b. et *c.* Bobines pour bobinages enchevêtrés.

1.12. — DIFFERENTS MODES DE REPRESENTATION DES BOBINAGES

Suivant la complexité du schéma, le type de machine et le degré d'initiation de l'utilisateur, on peut faire usage de l'un des quatre schémas décrits ci-dessous.

1.121. Projection frontale.

La machine est située de façon que son axe soit perpendiculaire à l'observateur et au plan dans lequel on désire représenter le schéma. Son entrefer apparaît alors sous la forme d'une circonférence et seuls sont dessinés les chignons des enroulements situés sur la partie arrière de la machine et les connexions électriques entre sections (ou bobines) sur la partie avant. Les faisceaux logés dans le fer n'apparaissent que sous la forme d'un petit cercle sur lequel aboutissent chignons et connexions. Les sens de courant sont représentés à un instant donné :

— par une *croix placée dans le petit cercle*, s'ils s'éloignent de l'observateur (la croix symbolise l'empennage de la flèche qui suivrait le courant) ;

— par un *point placé au centre du petit cercle*, s'ils se rapprochent de l'observateur (pointe de la flèche).

Les encoches, bien que non représentées, peuvent être numérotées. Dans ce cas, s'il s'agit d'un bobinage à deux couches, les faisceaux supérieurs sont repérés par le numéro de l'encoche, et les faisceaux en fond d'encoche par le même numéro primé. Dans les induits à collecteur, on numérote les faisceaux en attribuant les numéros impairs aux faisceaux placés près de l'entrefer, et les numéros pairs aux faisceaux placés en fond d'encoche (*fig.* 3).

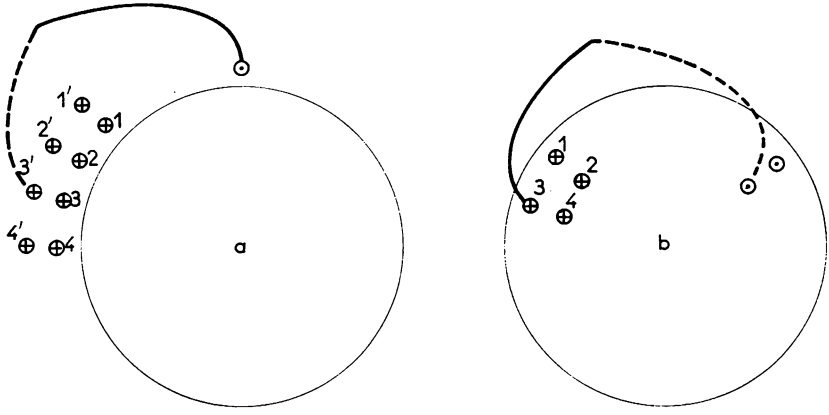


Fig. 3.

1.122. Développement panoramique.

Il suppose que la machine est placée de sorte que son axe soit dans le plan du dessin. L'entrefer est alors déroulé dans ce plan, à partir d'une génératrice géométrique.

Les faisceaux situés dans le fer apparaissent alors entièrement, ainsi que les chignons et les liaisons électriques.

Les sens de courant s'indiquent également par des flèches. Nous conseillons dès maintenant de placer les flèches montantes à un niveau supérieur par rapport aux flèches descendantes.

Tous les traits sont pleins pour représenter un bobinage à une seule couche. Par contre, dans le cas d'un bobinage à deux couches, on représente en pointillé la partie située au fond de l'encoche ainsi que la moitié du chignon (*fig.* 4).

A un stade plus évolué, en courant alternatif, nous supprimerons la partie pointillée du faisceau et un seul trait représentera les deux faisceaux (*fig.* 5).

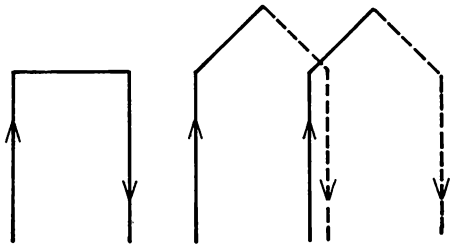


Fig. 4.

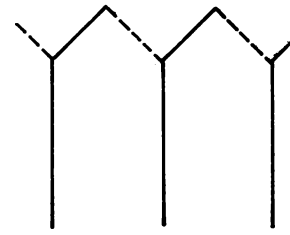


Fig. 5.

1.123. Représentation développée.

Cette représentation, assez peu employée, d'ailleurs à tort, s'apparente aux schémas développés utilisés en installations électriques. Les conducteurs y sont représentés en ligne droite à raison généralement d'une ligne par phase ou par voie d'enroulement. Chaque faisceau est représenté par un demi-cercle ou un tiret. Dans un induit, les lames intercalées entre les sections se représentent par une petite circonférence. Les numéros des encoches sont également indiqués, ainsi que ceux des lames du collecteur (*fig.* 6). Nous comprendrons mieux l'intérêt de cette représentation pour l'étude des schémas un peu complexes.

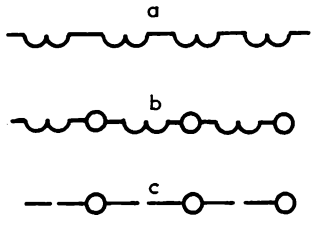


Fig. 6.

1.124. Représentation par tableaux chiffrés.

On atteint là le stade le plus évolué de l'abstraction. Les conducteurs y sont seulement figurés par leurs numéros ou par ceux des encoches dans lesquelles ils sont logés.

1.13. — MOYENS DE CONTROLE DES SCHEMAS

Sans vouloir raisonner sur des exemples précis, nous allons indiquer deux moyens de contrôle qui peuvent être utilisés.

1.131. Courbe des potentiels au collecteur.

Ce procédé s'applique évidemment aux enroulements à collecteurs. Il consiste à évaluer, en unités arbitraires, les variations de tension tout au long du collecteur. Pour ce faire, considérons une lame quelconque à laquelle nous fixons un potentiel quelconque. Il est commode, mais nullement obligatoire, de prendre le potentiel zéro. A partir de cette lame, nous allons suivre l'enroulement, section par section, jusqu'au retour à la lame de départ. Chaque fois que le parcours s'effectue dans le même sens que le courant qui circule dans un conducteur, le potentiel augmente à l'extrémité de ce conducteur d'une unité. Inversement, le potentiel diminue d'une unité à l'extrémité d'un conducteur lorsque le parcours s'y est effectué en sens inverse du courant (*fig.* 7).

Nous verrons ultérieurement comment ce contrôle permet :

— de *s'assurer que l'enroulement est équilibré* ;

— de *placer correctement les balais.*

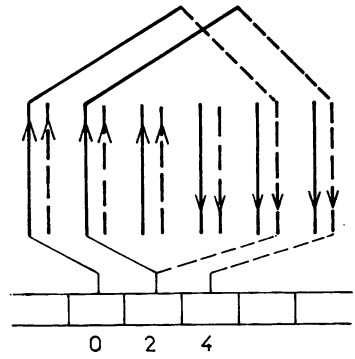


Fig. 7.

1.132. Variations du flux dans l'entrefer.

Ce procédé s'applique plus spécialement aux enroulements à courant alternatif sans collecteur .

Ayant déterminé les sens des courants instantanés à un instant donné dans les conducteurs des différentes phases, nous allons déterminer la courbe de l'induction dans l'entrefer.

A partir d'une encoche dans laquelle le courant vient de changer de sens, nous fixons l'induction à zéro et nous parcourons l'entrefer en augmentant l'induction de une unité sous toutes les encoches parcourues par des courants montants, et en la diminuant de une unité chaque fois que les encoches correspondantes sont parcourues par un courant descendant. En courant triphasé, il est recommandé de choisir l'instant correspondant à l'intensité maximale pour une phase ; à ce moment là, les deux autres phases sont parcourues par des courants inversés par rapport au courant précédent et égaux en valeur absolue à la moitié de l'intensité maximale. On modifie alors l'induction de une ou deux unités suivant la valeur du courant dans l'encoche correspondante (*fig.* 8).

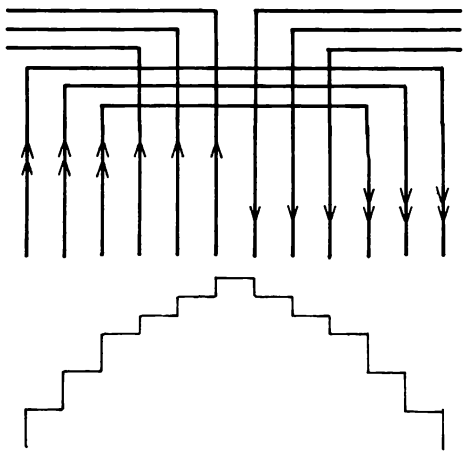


Fig. 8.

2. Conditions générales d'établissement des schémas

Avant de traiter des exemples concrets de bobinage, nous allons définir les règles d'établissement valables quels que soient les schémas.

2.1. — ENROULEMENTS INDUCTEURS SUR POLES SAILLANTS

Pour obtenir des pôles voisins de noms différents, il suffit que les courants parcourent les enroulements en sens inverse pour un observateur placé devant l'entrefer. La *figure* 9 indique comment on réalise les connexions pour des couplages en série et en parallèle.

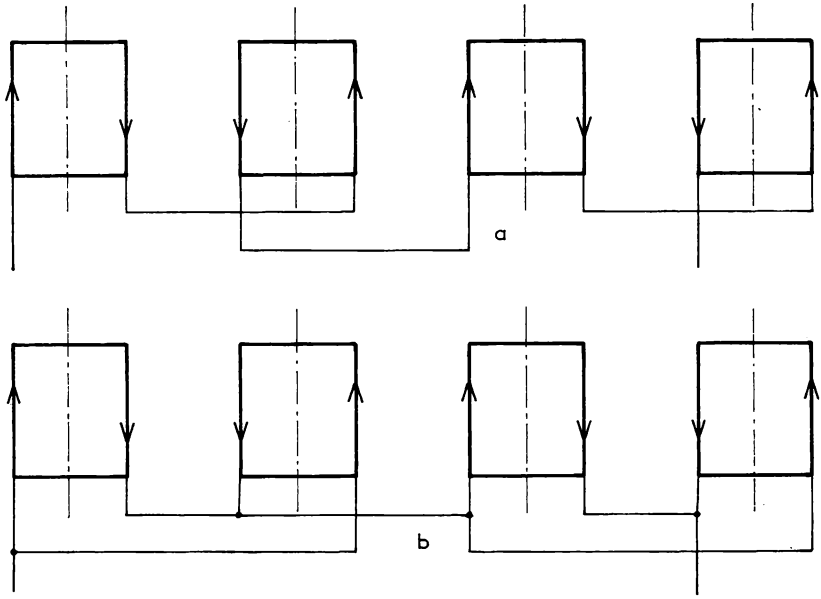


Fig. 9.

a. Couplage série.
b. Couplage série parallèle (2 groupes de chacun deux bobines en série, les 2 groupes sont couplés en parallèle).

2.2. — ENROULEMENTS FERMÉS SANS COLLECTEUR, PLACÉS DANS DES ENCOCHES

On les rencontre dans les stators et rotors de moteurs d'induction et dans les induits d'alternateurs. Le raisonnement établi sur des induits de générateurs est valable pour des enroulements de moteur, en remarquant qu'à la chute de tension près la force contre-électro-motrice du moteur est égale à la tension appliquée et, qu'en conséquence, le bobinage du moteur, conçu pour que s'y développe une force contre-électro-motrice semblable à la tension délivrée par un générateur, est lui-même semblable à l'enroulement du générateur.

2.21. — OBTENTION DE LA FORCE ELECTRO-MOTRICE MAXIMALE

Considérons le système inducteur et l'entrefer d'une machine. Le flux est réparti dans l'entrefer de telle sorte que le vecteur induction est normal en chaque point de l'entrefer et s'inverse périodiquement, en sorte que la courbe représentant les variations de l'induction dans l'entrefer présente p zones positives et p zones négatives. Chaque région correspond à la zone d'influence d'un pôle. Pour obtenir une force électromotrice sinusoïdale, la courbe qui représente les variations du flux dans l'entrefer doit être elle-même une sinusoïde. Cette sinusoïde se développe sur tout l'entrefer et correspond à un arc égal à $2p\ \pi$, $2p$ étant le nombre de pôles de la machine (*fig.* 9 *bis*).

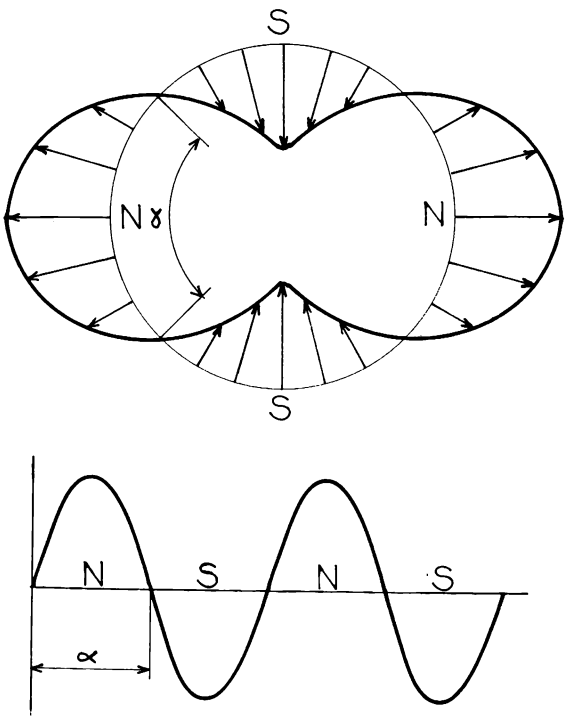


Fig. 9 *bis.*

Nous nous trouvons en présence de deux catégories d'arcs différentes :

◆ Les *arcs géométriques* auxquels correspondent des *angles au centre géométriques* que l'on peut mesurer avec un rapporteur. L'entrefer total est mesuré par 2π radians ou 360° géométriques ;

◆ Les *arcs électriques* auxquels correspondent des *angles électriques* et qui définissent les variations de l'induction dans l'entrefer. L'entrefer total mesure alors $p\pi$ radians ou encore $p \times 360^o$ électriques.

Par définition, l'arc délimitant la zone d'influence d'un pôle constitue le pas polaire. Sa valeur exprimée en arc géométrique, est égale à π/p. Exprimée en arc électrique, elle est toujours égale à π radians ou 180^o.

EXEMPLES : *Une machine bipolaire a un entrefer qui correspond à* 360^o *géométriques et à* 360^o *électriques.*

Une machine à huit pôles comporte un entrefer dont l'arc électrique de 180^o *est représenté par un arc géométrique de* 45^o.

Considérons maintenant un point de l'entrefer, P, par exemple (*fig.* 9 *ter*). Lorsque le système inducteur est animé d'un mouvement de rotation uniforme, l'induction varie, en ce lieu, en fonction du temps. Il est facile de voir d'ailleurs que la variation en fonction du temps, de l'induction en un point donné, est identique à la variation spatiale dans l'entrefer à un instant donné. Pour un tour du système inducteur, la courbe présente p maximums et p minimums.

La force électro-motrice induite dans un conducteur, placé le long d'une génératrice de l'entrefer, change chaque fois que le vecteur induction s'inverse. Pour une vitesse de rotation constante elle est proportionnelle à l'induction au droit du conducteur, ainsi que l'indique la formule :

$$\vec{E} = \vec{B}L\vec{v}$$

Ainsi, pour un tour, la force électro-motrice induite dans le conducteur présente p suites de valeurs positives et p suites de valeurs négatives, d'où l'origine de la formule :

$$f = pN$$

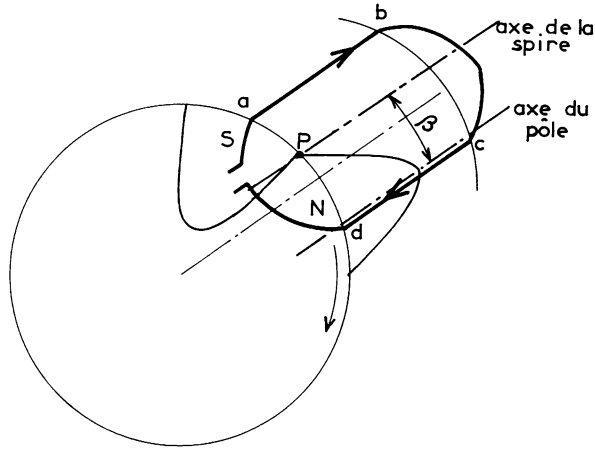


Fig. 9 *ter.*

Le dessin est représenté avec les conventions suivantes :
— l'entrefer est considéré par un observateur placé face au stator ;
— le flux est produit par le rotor ;
— le courant circule dans le sens de déplacement des électrons ;
— le système inducteur est à huit pôles.

Recherchons maintenant quel doit être l'embrassement d'une spire pour y recueillir la force électro-motrice maximale. Les relations de proportionnalité entre valeur efficace et valeur instantanée maximale nous indiquent qu'il suffit de rechercher la condition de plus grande force électro-motrice instantanée maximale.

Pour un conducteur tel que *ab*, la f.é.m. passe par sa valeur maximale lorsque ce conducteur est coupé par le vecteur induction B maxi.

Pour une spire telle que *abcd*, la f.é.m. totale est égale à la somme des f.é.m. induites dans chaque conducteur et elle sera maximale lorsque chacun des conducteurs sera lui-même le siège de sa f.é.m. maximale. Cette condition n'est réalisée que lorsque les deux conducteurs sont coupés simultanément: l'un par $+ B_{max}$, l'autre par $- B_{max}$, autrement dit lorsque l'intervalle qui les sépare est égal au pas polaire.

Ce pas est également appelé *pas diamétral* et sa valeur géométrique est égale à π/p.

Il est facile de voir également que la f.é.m. maximale est atteinte lorsque l'axe du pôle inducteur aura dépassé de 90° électriques, l'axe de la spire, ou encore lorsque l'axe du pôle coïncide avec le brin de la spire rencontré le dernier dans le sens du mouvement. A ce moment le flux à travers la spire est nul et nous retrouvons là une explication physique du déphasage de 90° entre les variations du flux et la force électro-motrice induite.

2.22. — EFFETS D'UNE VARIATION DU PAS

Le pas diamétral conduit à la force électro-motrice maximale. Il est possible de concevoir une spire avec un pas plus ou moins grand que le pas diamétral. Les schémas des *figures* 10, dans lesquelles les côtés des spires sont proportionnels aux valeurs des tensions qui y sont induites, montrent que, dans les deux cas, la force électro-motrice résultante sera plus petite que celle obtenue avec un pas diamétral et que sa diminution sera identique pour un raccourcissement et un allongement identiques. Cette dernière éventualité n'est pas à envisager sur le plan pratique, puisqu'elle est désavantageuse à la fois pour la tension et pour le volume de cuivre nécessaire pour former la spire.

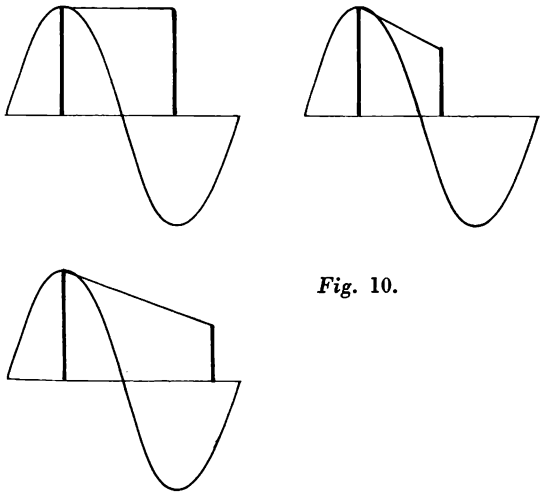


Fig. 10.

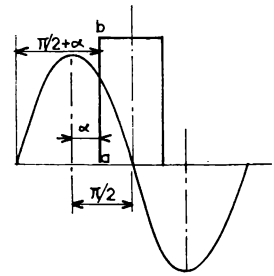


Fig. 10 *bis.*

Par contre, nous allons examiner les conséquences d'un pas raccourci. La diminution de force électro-motrice résultant du raccourcissement du pas peut être compensée en augmentant le nombre de spires dans la même proportion.

On appelle *facteur de raccourcissement*, le nombre k_r par lequel il faut diviser le nombre de spires initial pour obtenir le nombre de spires raccourcies donnant la même tension résultante. Il est égal au rapport de la force électro-motrice induite dans une spire raccourcie à la force électro-motrice induite dans une spire diamétrale.

La f.é.m. d'une spire diamétrale a pour valeur :

$$E_{max} = 2B_{max}Lv$$

Pour un pas raccourci de l'angle 2α, la f.é.m. maximale est atteinte lorsque le flux dans la spire est nul, c'est-à-dire lorsque l'axe de la spire est à une distance $\pi/2$ de l'axe du pôle, ou encore lorsque le brin *ab* de la spire est à une distance $\pi/2 + \alpha$ de l'origine de la courbe représentant les variations spatiales de l'induction.

La f.é.m. a alors pour valeur dans chacun des brins :

$$B_{max} \sin (\pi/2 + \alpha)Lv$$

et pour la spire complète :

$$2B_{max} \sin (\pi/2 + \alpha)Lv$$

Le facteur k_r a donc une valeur égale à :

$$k_r = \frac{2B_{max}Lv \sin (\pi/2 + \alpha)}{2B_{max}Lv}$$

$$k_r = \cos \alpha$$

D'où la règle suivante :

Le facteur de raccourcissement du pas est égal au cosinus du demi-angle électrique de raccourcissement du pas polaire.

Indiquons également qu'on le trouve fréquemment sous la forme équivalente :

$$k_r = \sin \frac{\beta\pi}{2}$$

en appelant β le rapport du pas réel au pas diamétral.

EXEMPLE : *Pour un raccourcissement de* 30^o *électriques, le facteur de raccourcissement est égal à :*

$$k_r = \cos 15^o = 0{,}966$$

Pour retrouver la même force électro-motrice qu'avec un pas diamétral, il faut multiplier le nombre de spires diamétrales par 1/0,966, soit 1,035. Mais il faut remarquer que les chignons ont diminué de longueur et que cette diminution représente une proportion de 30/180 soit 16,6 %.

Le raccourcissement du pas permet donc une économie de cuivre et elle est d'autant plus marquée que les chignons représentent une proportion plus grande du volume global de cuivre. Le volume de cuivre étant diminué, les pertes dans le cuivre le sont aussi. On note également une atténuation des harmoniques. En revanche, il faut reprocher au pas raccourci une plus grande complexité de schéma.

2.23. — EFFETS DE L'ETALEMENT DES BOBINES

Jusqu'à maintenant nous avons raisonné en supposant que tous les conducteurs formant le bobinage étaient concentrés en un même point de l'entrefer sous chaque pôle. En réalité, on est obligé de les répartir dans plusieurs encoches ; d'où la conséquence suivante :

— si les *bobines sont concentriques*, leurs pas sont différents ; les f.é.m. qui y sont induites sont en *phase* mais elles sont de *valeurs inégales* ;

— si les bobines sont *identiques*, leurs axes sont nécessairement décalés et les f.é.m. qui y sont induites sont *égales en valeur maximale*, mais *déphasées* dans le temps.

Dans les deux cas, la résultante des tensions induites est inférieure à la tension que l'on aurait recueilli dans une bobine unique présentant tous ses conducteurs en un point de l'entrefer. On fait alors intervenir un nouveau coefficient, appelé *coefficient de bobinage*. Un calcul sommaire montre qu'il est égal au rapport de la somme géométrique des f.é.m. maximales induites dans chaque bobine au produit de la plus grande f.é.m. induite par le nombre de bobines ; remarquons que ce dernier terme représente la somme arithmétique des f.é.m. induites dans le cas où les bobines ont des pas identiques et sont décalées dans l'espace (*fig.* 11).

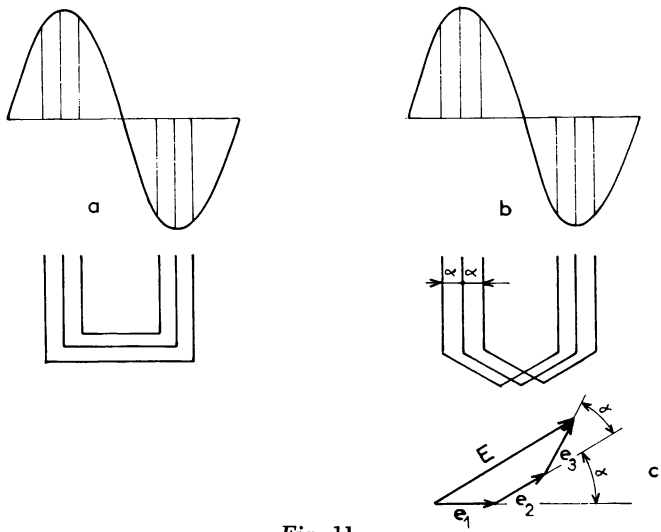


Fig. 11.

EXEMPLE : *Considérons un bobinage monophasé réparti dans* 8 *encoches sur la moitié du pas polaire.*

Les encoches sont donc distantes de 15° électriques, quel que soit le nombre de pôles de la machine.

Le coefficient de bobinage a pour valeur :

$$\frac{1 + \cos 15^\circ + \cos 30^\circ + \cos 45^\circ}{4} = 0{,}885$$

Si le nombre d'encoches augmente, le coefficient de bobinage tend vers une limite qui n'est autre que le rapport de la corde à l'arc électrique sur lequel s'étale le bobinage.

Dans le cas des enroulements triphasés, chaque phase occupe un tiers de l'entrefer, soit 60° sous chaque pôle, d'où la limite du coefficient de bobinage $3/\pi = 0{,}955$.

2.24. — COEFFICIENT DE BOBINAGE GLOBAL

Dans un bobinage à pas raccourci, le raccourcissement du pas et l'étalement du bobinage contribuent simultanément à la réduction des tensions. Le coefficient global de bobinage a alors pour valeur :

K = coefficient de raccourcissement × coefficient de bobinage.

C'est ainsi que sur une machine triphasée, dont le pas est raccourci de 45°, il prend pour valeur limite :

$$K = \cos 22^\circ 30' \times 0{,}955 = 0{,}883$$

2.25. — CALCUL DU COEFFICIENT DE KAPP

La formule donnant la f.é.m. pour un enroulement massé s'obtient facilement par dérivation.

Pour une spire à pas diamétral, elle a pour valeur :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt}$$

avec $\varphi = \Phi_{max} \sin \omega t$

d'où, en dérivant par rapport à t :

$$e = \Phi_{max}\omega \cos \omega t$$

Cette expression prend sa valeur maximale pour $\cos \omega t = 1$:

$$E_{max} = \Phi_{max}\omega$$

et la valeur efficace est égale à :

$$E = \frac{\Phi_{max}\omega}{\sqrt{2}}$$

ce qui peut s'écrire, en remarquant que $\omega = 2\pi pn$:

$$E = \sqrt{2}\,\pi pn\Phi_{max}$$

Pour l'ensemble des spires en série, la f.é.m. résultante prend la valeur :

$$E = \sqrt{2}\,\pi pn S\Phi_{max}$$

Habituellement on fait intervenir le nombre de conducteurs N dans l'entrefer au lieu du nombre de spires S, et, comme $S = N/2$, il vient en définitive :

$$E = 2{,}22\ pn N\Phi$$

Cette formule n'étant valable que pour des conducteurs concentrés en un seul point, elle est généralement donnée sous la forme :

$$E = kpn N\Phi$$

et on donne à k le nom du *coefficient de Kapp*.

Pour une machine triphasée à pas non raccourci, et dans laquelle la tension ne présente pas d'harmoniques, ce coefficient a pour limite : 2,22 × coefficient de bobinage, soit : 2,22 × 0,955 = 2,12.

2.26. — DISPOSITION DES BOBINES DANS L'ENTREFER

Considérons maintenant un entrefer à quatre pôles, et, pour simplifier, admettons quatre encoches, soit une encoche par pôle.

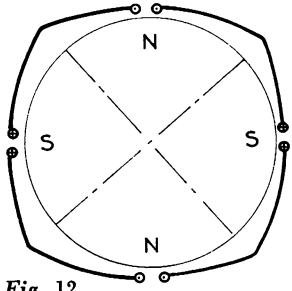


Fig. 12.

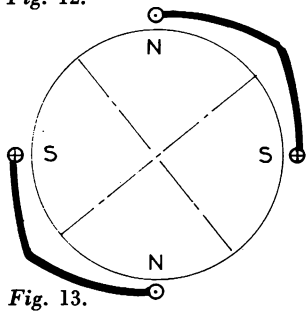


Fig. 13.

Les sens des courants s'inversent lorsqu'on passe d'un pôle à l'autre. Nous voyons qu'il est possible d'envisager deux dispositions différentes des bobines :

◆ La **première disposition,** conforme à la *figure* 12, fait intervenir quatre bobines identiques couvrant chacune un quart de l'entrefer. Il y a autant de *bobines* que de *pôles* et ce résultat peut s'étendre à un nombre de pôles quelconque. Un tel bobinage est dit *bobinage par pôles*.

◆ La **deuxième disposition** possible est illustrée par la *figure* 13. Il n'y a plus cette fois que deux bobines qui occupent, chacune, la surface d'un pas polaire et qui sont séparées entre elles d'un pas polaire. Ces bobines comportent un nombre de spires double des bobines de la première disposition. Au total, il y a donc bien le même nombre de conducteurs dans l'entrefer et, comme les sens de courant sont les mêmes dans les mêmes encoches, nous en concluons que la f.é.m. est identique dans les deux cas.

Ce type de bobinage est dit à *pôles conséquents* et il n'est évidemment concevable que pour des machines ayant au moins quatre pôles. Il est caractérisé par un *nombre de bobines égal à la moitié du nombre de pôles et espacées entre elles d'un pas polaire.*

2.27. — CONNEXIONS ENTRE BOBINES

La seule règle impérative est de respecter les sens de courants imposés sous les différents pôles (1).

Si nous assimilons à un générateur chaque bobine, (ou chaque groupe de bobines), placées sous un même pôle, il est possible de coupler ces générateurs :

— en *série*, de sorte que *leurs tensions s'ajoutent* ;

— en *parallèle*, et alors les *courants s'ajoutent* ;

— en *série parallèle*, en groupant en *parallèle* un certain nombre de *circuits identiques* composés eux-mêmes de *bobines en série.*

Dans le cas où un enroulement comporte des circuits en parallèle, il est indispensable que chaque circuit fournisse une tension identique à celle produite par chacun des autres, sinon il en résulterait des courants de circulation. C'est pour cette raison que lorsque le nombre de pôles s'y prête, les différentes voies d'enroulement sont constituées en groupant en série des bobines opposées diamétralement et non voisines. On compense ainsi dans une certaine mesure les différences d'impédance ou de réluctance provenant d'une dissymétrie de l'entrefer. La *figure* 14 indique l'application de ce procédé pour un bobinage à huit pôles.

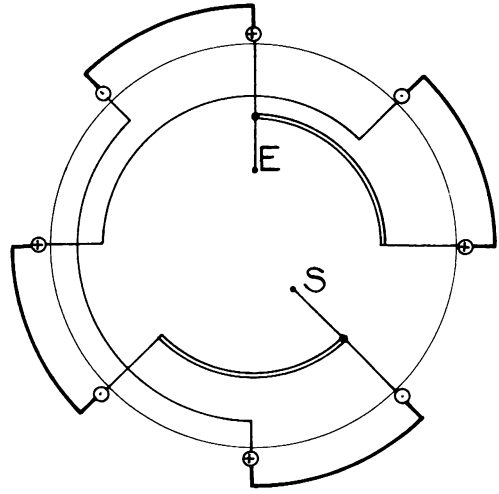


Fig. 14.

◆ **Cas des enroulements à deux étages.**

Nous examinerons le cas fréquent où les encoches ne contiennent que quelques spires formées par des barres.

(1) Dans les enroulements à plusieurs polarités, il faudra s'imposer d'autres conditions.

Sur la *figure* 15 *b* la mise en série des différents conducteurs actifs s'effectue en groupant d'abord tous les *conducteurs placés sous un même pôle* : la bobine 1-3′ est reliée à la bobine 2-4′. Un tel bobinage est dit *imbriqué.*

Il est possible de réaliser les mises en série en reliant d'abord *tous les conducteurs homologues placés sous tous les pôles de même nom* jusqu'à revenir sous le pôle de départ après avoir parcouru tout l'entrefer. Sur la *figure* 15 *c* on peut, par exemple, réaliser le couplage suivant : 1-3′, 5-7′, 2-4′, 6-8′. Un tel bobinage est dit *ondulé.* Il est évident que la notion de bobinage ondulé n'est concevable que pour les machines comportant au moins quatre pôles.

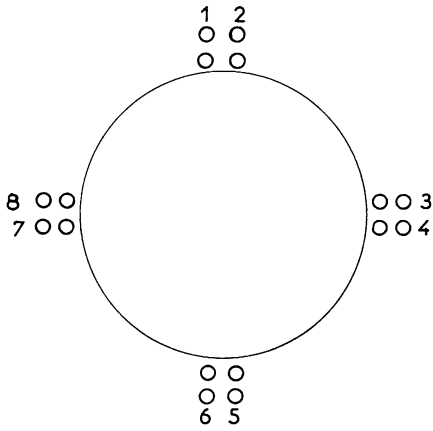


Fig. 15 *a.*

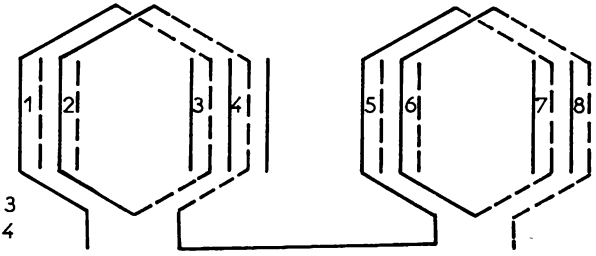


Fig. 15 *b.*

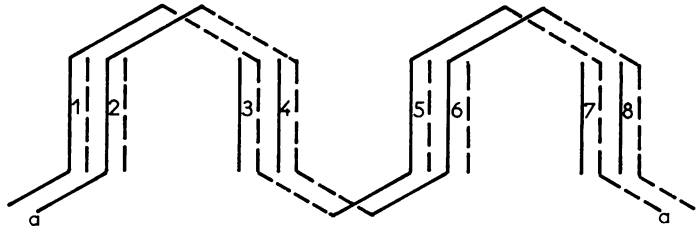


Fig. 15 *c.*

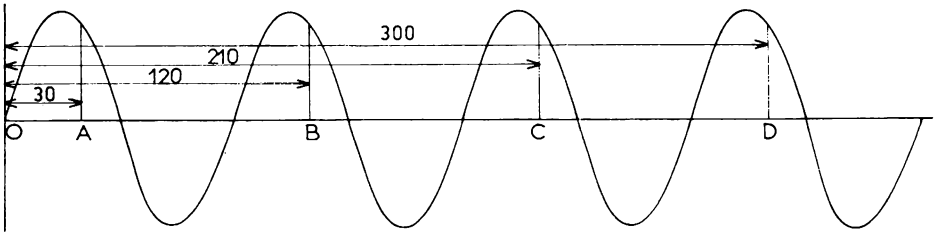


Fig. 16.

Les points A, B, C, D définissent par rapport à O des angles géométriques égaux à 30, 120, 210, 300°. La distribution spatiale du flux dans l'entrefer est telle qu'à ces points l'induction y a la même valeur.

Les conducteurs placés en A, B, C, D seront chacun le siège d'une f.é.m. présentant, par rapport à celle d'un conducteur placé en O, un déphasage égal à 120°.

2.28. — ÉQUILIBRE DES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES SUR LES DIFFÉRENTES PHASES

Dans le cas d'un bobinage triphasé, il est nécessaire d'obtenir des forces électro-motrices identiques sur chacune des phases. Cette condition est obtenue très simplement en réalisant des schémas identiques à tous points de vue pour chacune des phases :

— *identité des pas* ;

— *identité des arcs* sous chaque pôle pour l'étalement des conducteurs ;

— *identité des connexions* entre les bobines homologues.

Dans la pratique, un enroulement triphasé est réparti régulièrement sur tout l'entrefer, chaque phase en occupant le tiers.

Ces conditions expliquent aussi pourquoi on se contente, en général, de tracer complètement une seule phase et de repérer seulement l'entrée des autres phases.

2.29. — DÉPHASAGES ENTRE LES DIFFÉRENTES PHASES

Là encore, la règle est très simple.

Pour obtenir, dans des enroulements différents, des déphasages entre les forces électro-motrices qui y sont induites, il suffit de décaler (dans l'entrefer) les enroulements, l'un par rapport à l'autre, d'un angle tel que le flux inducteur y présente lui-même ce déphasage.

Plus simplement, on peut dire que les entrées des enroulements qui doivent produire des tensions déphasées de φ seront décalées dans l'entrefer d'un angle électrique $-\varphi \pm 2k\pi$, c'est-à-dire d'un angle géométrique :

$$\alpha = -\frac{\varphi \pm 2k\pi}{p}$$

Le signe — correspond à un angle compté dans le sens du mouvement du système inducteur et le signe + à un angle compté en sens inverse du mouvement du système inducteur.

Exemple : sur une machine triphasée à 12 pôles, le décalage entre l'entrée de la phase 1 et celle de la phase 2 doit correspondre à 120^0 électriques, soit un angle géométrique :

$$\alpha = \frac{120 \pm k360}{6} = 20 \pm k\ 60$$

En comptant les angles à partir de l'entrée de la phase 1, la phase 2 pourra être décalée des angles suivants :

+ 20	+ 80	+ 140	+ 200	+ 260	+ 320
— 40	— 100	— 160	— 220	— 280	— 340

Il est facile de voir que les angles affectés du signe négatif déterminent dans l'entrefer les mêmes points que les angles affectés du signe positif.

La phase 3, déphasée de — 240° par rapport à la phase 1, est décalée d'un angle géométrique ayant pour valeur :

$$\beta = \frac{240 \pm k360}{6} = 40 \pm k\ 60$$

Les entrées possibles sont donc :

$+ 40 \quad + 100 \quad + 160 \quad + 220 \quad + 280 \quad + 340$

Chacune de ces entrées est *compatible* avec *chacune des entrées de la phase* 2. Par exemple, on pourra utiliser

Phase 1	Phase 2	Phase 3
0	80	100
0	80	220
0	80	280
0	260	280

etc.

D'une manière générale, l'entrée d'une phase étant fixée, il y a autant de positions possibles pour l'entrée d'une autre phase qu'il y a de paires de pôles dans la machine (1).

2.3. — ENROULEMENTS FERMÉS SUR COLLECTEUR

Nous supposerons connue, au moins très sommairement, l'organisation générale d'un enroulement induit et nous nous contenterons de rappeler quelques résultats et définitions propres à ces enroulements, avant d'en aborder la théorie générale (2).

---

(1) Nous croyons utile de mettre en garde le lecteur contre le raisonnement simple et faux que nous avons entendu trop souvent, et qui consiste à dire qu'un décalage géométrique de 120° des entrées donne toujours une solution valable. On voit précisément sur l'exemple choisi qu'il n'en est rien.

(2) Le lecteur peut également, surtout en première lecture, n'aborder cette étude théorique qu'après avoir vu les exemples d'application cités à partir de la page 209.

L'enroulement en tambour qui équipe tous les induits a été mis au point en 1873 et on comprendra que nous ignorions volontairement les autres types qui ont pu exister.

Considérons donc un système bipolaire comprenant les *inducteurs*, *l'induit* et *quelques conducteurs*. Le *plan neutre* partage l'entrefer en *deux zones* soumises chacune à l'action d'un pôle inducteur. L'intersection de ce plan neutre avec l'induit fait apparaître sur celui-ci les *lignes neutres* qui se confondent avec des génératrices géométriques du cylindre induit (*fig.* 17).

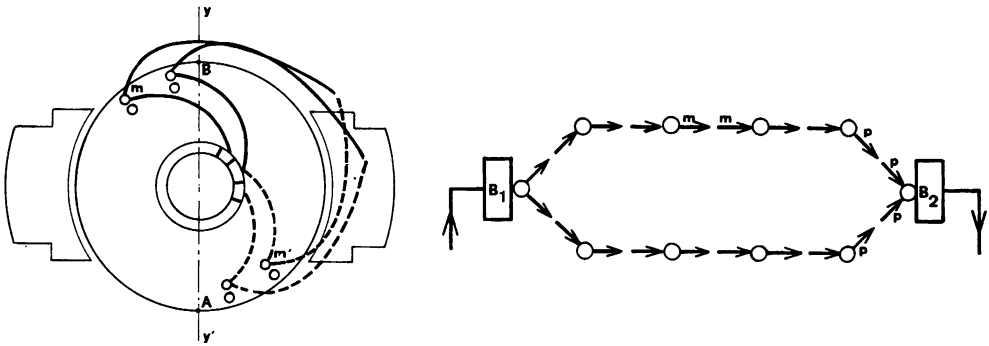


Fig. 17.

Les conducteurs actifs sont répartis dans l'entrefer de sorte que les forces électro-motrices induites s'ajoutent ; c'est ainsi que tous les conducteurs tels que *m* situés sous un pôle sont reliés, en principe, à des conducteurs tels que *m'*, placés sous l'autre pôle.

Par rapport aux balais, l'enroulement est divisé en un certain nombre de *voies d'enroulements* (deux sur l'exemple choisi) reliées en parallèle à l'intérieur de la machine.

Du fait de la rotation de l'induit par rapport aux inducteurs et par rapport aux balais, les voies d'enroulements se modifient constamment, chaque conducteur occupant successivement toutes les positions possibles.

Le courant circulant *toujours dans le même sens dans chacune des voies d'enroulement*, il en résulte qu'il doit s'*inverser dans les conducteurs qui changent de voie d'enroulement*, donc, en principe, au moment de leur *passage sous les balais*. Cette inversion ainsi que les conséquences qui en découlent constituent les *phénomènes de commutation*. Sur la *figure* 17 on voit que le courant qui circulait dans la section S de *p* vers *p'* lorsque cette section était dans la voie d'enroulement supérieure, circulera de *p'* vers *p* lorsqu'elle passera dans la voie d'enroulement inférieure.

La *force électro-motrice globale* de la machine est égale à la *somme des forces électro-motrices induites dans chacune des sections qui constituent une voie d'enroulement.*

Le *courant global* débité par la machine est égal à *la somme des courants débités par chacune des voies d'enroulement.*

Nous pouvons déjà définir un certain nombre de qualités qui découlent des propriétés énoncées ;

— l'*obtention de la force électro-motrice maximale* est liée à la production de la force électro-motrice maximale dans chacune des sections composant une voie d'enroulement, et dans le groupement des sections en un nombre minimal de voies d'enroulement ;

— le *débit maximal de la machine* est lié au groupement des conducteurs en un nombre maximal de voies d'enroulement ;

— la *puissance globale de la machine*, proportionnelle au produit EI, est indépendante du groupement des conducteurs en un plus ou moins grand nombre de voies d'enroulement ;

— l'*égalité* de la force électro-motrice de *chacune des voies d'enroulement* est nécessaire pour éviter les *courants de circulation interne.* Cette égalité est liée à une répartition symétrique du flux dans l'entrefer par rapport au plan neutre, à l'identité complète des différentes sections et à l'égalité du nombre des sections dans chaque voie d'enroulement.

2.31. — OBTENTION DE LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE MAXIMALE

Les conditions sont exactement les mêmes que pour une machine à courans alternatif et nous rappelons simplement les conclusions auxquelles nous sommet arrivés :

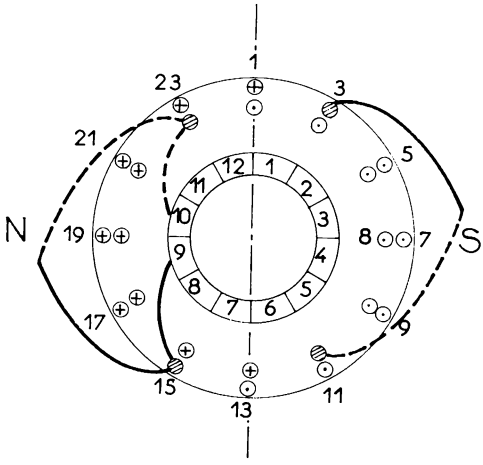
— la f.é.m. maximale est atteinte pour un pas diamétral ;

— il est possible de concevoir un bobinage avec des sections à pas raccourci.

2.32. — EFFETS D'UN PAS RACCOURCI

Le flux traversant la spire étant réduit, il en résulte, comme en courant alternatif, une réduction de la force électro-motrice, mais une autre conséquence beaucoup plus importante apparaît. La distribution du courant est modifiée dans la zone neutre. Le courant ne s'inverse plus lorsque la force électro-motrice est *nulle dans chacun des conducteurs*, mais lorsqu'elle est *nulle dans la spire.* Dans l'espace compris entre les spires en commutation, les conducteurs placés dans les mêmes encoches sont parcourus par des courants de sens différents.

Cette propriété a des incidences plutôt heureuses sur la commutation et sur la réaction d'induit. En effet, dans les conducteurs précédant la section mise en court circuit, et placés après les lignes neutres, le sens du courant est imposé par la polarité des balais situés de chaque côté de la voie d'enroulement, et il est précisément inversé par rapport au courant que tendent à y faire circuler la f.é.m. due au renversement de courant — $L dI/dt$, et la force électro-motrice induite par le flux du nouveau pôle. Par ailleurs, la réaction longitudinale d'induit qui a pour effet de diminuer la valeur du flux utile est également diminuée (*fig.* 18).



Il faut bien noter, en revanche, que l'utilisation d'un pas raccourci est incompatible avec des pôles de commutation. En effet, ceux-ci ne font sentir leur action que dans une zone très étroite de part et d'autre de chaque ligne neutre et un raccourcissement excessif du pas aurait pour effet d'amener les conducteurs en commutation à l'extérieur de cette zone d'action.

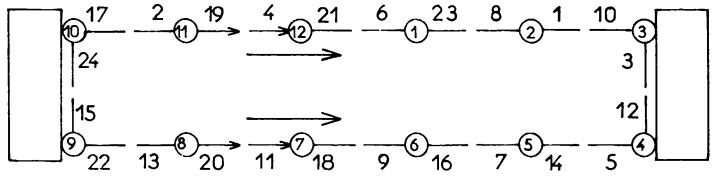


Fig. 18.

Remarquer que le sens du courant qui serait induit dans un conducteur entre 1 et 3 serait inversé par rapport au sens du courant qui y circule réellement. On retrouve avec un pas raccourci, les effets obtenus par un décalage des balais. Voir aussi la figure 70 plus détaillée.

2.33. — CONNEXIONS ENTRE SECTIONS

Une certaine analogie peut encore être établie avec les enroulements à courant alternatif, en ce qui concerne la forme des sections et le mode de groupement des différentes sections.

2.331. Forme des sections.

La mise en série des diffréentes sections qui constituent une voie d'enroulement se fait par l'intermédiaire des lames du collecteur. Dans tous les développements qui vont suivre, les sections seront réduites à une seule spire et la forme qui leur sera donnée sera obtenue en juxtaposant les fils de connexion avant, les faisceaux complets situés dans chaque encoche et les chignons arrière complets. Il en résulte que sur un schéma, la partie avant des chignons est complètement supprimée ; ce cas se rencontre d'ailleurs assez fréquemment en pratique puisque les machines un peu importantes sont souvent munies de sections à une seule spire.

◆ **Enroulements imbriqués.**

Ils sont obtenus en reliant en série des sections de telle sorte que les *faisceaux homologues de deux sections consécutives soient sous le même pôle.* On épuise ainsi tous les faisceaux sous le même pôle avant de passer au pôle voisin de nom contraire. La mise en série de deux sections consécutives s'exécutant par le collecteur, il en résulte nécessairement que la sortie d'une section quelconque de rang n est reliée à l'entrée de la section de rang $n + 1$ sur une lame de rang p, par exemple, et la sortie de section de rang $n + 1$ est reliée à l'entrée de la section $n + 2$ sur la lame $p + 1$ (1) (*fig.* 19).

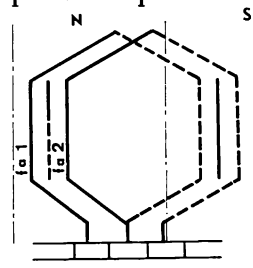


Fig. 19.

Ce faisant, en suivant les faisceaux homologues des sections consécutives, on parcourt l'entrefer en avançant toujours dans le même sens. Sur le collecteur, on peut suivre également l'enroulement en parcourant, toujours dans le même sens, les lames dans l'ordre où les entrées y sont connectées.

La notion d'enroulement imbriqué est concevable quelle que soit la polarité de la machine.

◆ **Enroulements ondulés.**

Sur une machine multipolaire il est possible d'envisager un autre mode de liaison des sections. Au lieu d'épuiser successivement tous les faisceaux sous un même pôle, on relie d'abord en série *tous les faisceaux occupant la même position relative sous tous les pôles successifs.* La section est ainsi définie par le conducteur (ou le faisceau) situé près de l'entrefer en dessus d'encoche, sous un pôle

(1) Nous verrons ultérieurement des dispositions un peu plus complexes dans les enroulements multiples.

d'un certain nom (N par exemple) et par le conducteur situé en fond d'encoche sous le pôle de nom contraire voisin (S par exemple) ; la deuxième section sera prise sous les pôles Nord et Sud suivants (*fig.* 20).

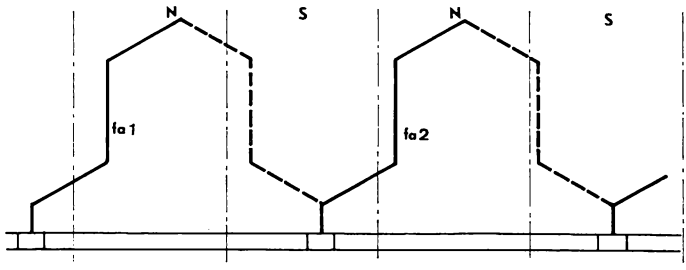


Fig. 20.

La liaison avant s'effectue par le collecteur. Les lames qui servent aux différentes mises en série sont nécessairement décalées entre elles d'un angle identique à celui qui sépare les sections elles-mêmes.

2.332. Modes de connexion.

Nous verrons ultérieurement dans des exemples d'application comment l'on peut faire varier le nombre de voies d'enroulement en modifiant la répartition des conducteurs, et les relations numériques qui en découlent.

Pour l'instant, nous indiquons simplement les résultats qu'on peut atteindre.

◆ **Enroulement parallèle simple.**

Le nombre de voies d'enroulement $2a$ est égal au nombre de pôles $2p$.

◆ **Enroulements parallèles multiples.**

Le nombre de voies d'enroulement est égal à un multiple du nombre de pôles :

$$2a = 2\ qp$$

Le facteur q définit le facteur ou l'ordre de multiplicité. Il est toujours entier.

◆ **Enroulement série simple.**

Le nombre de voies d'enroulement est toujours égal à 2 quel que soit le nombre de pôles.

◆ **Enroulement série multiple ou série parallèle.**

Le nombre de voies d'enroulements est évidemment pair, mais sans rapport immédiat avec le nombre de pôles. Par exemple, on peut avoir avec 6 pôles ($2p = 6$) : 4, 6, 8, 10... voies d'enroulement.

Nous verrons plus tard que les enroulements imbriqués conduisent nécessairement à des types parallèles et les enroulements ondulés à des types série et série parallèle. Aussi, dans la pratique, on confond souvent les expressions parallèle et imbriqué d'une part, série et ondulé d'autre part.

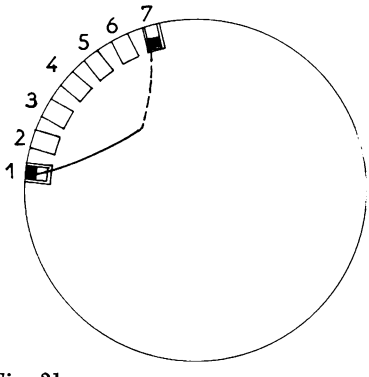
2.333. Définition des pas.

Dans les exemples très généraux déjà évoqués on a pu remarquer que la section embrasse une certaine portion de l'entrefer. Nous savons déjà que l'arc embrassé peut être égal ou inférieur à π/p.

En pratique, pour des raisons de commodité, on n'exprime pas les pas d'après la mesure de l'arc, mais d'après le nombre d'encoches ou le nombre de faisceaux compris dans cet arc.

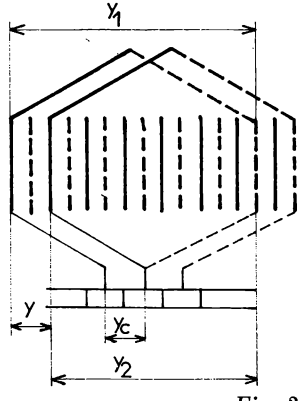
◆ **Pas sur le fer** (*fig.* 21).

C'est une notion essentiellement pratique, utilisée dans les ateliers de bobinage pour la pose des sections dans les encoches. On définit ce pas par les numéros des encoches dans lesquelles se trouvent logés les deux faisceaux de la section.



La section a ses deux faisceaux logés dans les encoches 1 et 7, le pas sur le fer est de 1-7.

Fig. 21.



On vérifie que
$y_1 = 13$
$y_2 = 11$
$y = 2$
$y_c = 1$

Fig. 22.

◆ **Pas arrière y_1** (*fig.* 22 et 23).

Il définit l'écartement des deux faisceaux de la section et, dans les schémas, il est l'homologue du pas sur le fer.

Il est égal au nombre d'intervalles séparant, sur le schéma, le faisceau aller du faisceau retour. Les faisceaux aller et retour comportant, nécessairement, l'un un numéro impair, l'autre un numéro pair, il en résulte que le *pas arrière y_1 est toujours impair.*

◆ **Pas avant y_2 ;**

Il définit l'arc embrassé sur la face avant de l'induit par la connexion de mise en série de deux sections consécutives.

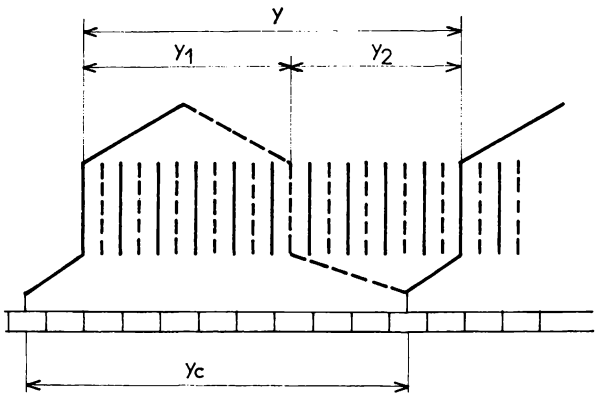


Fig. 23. — On vérifie que :

$y_1 = 11$
$y_2 = 9$
$y = 20$
$y_c = 10$

Pour un enroulement *ondulé*, il est donc compté dans le *même sens* que le pas arrière y_1 (*fig.* 23), alors que dans un enroulement *imbriqué*, il se compte nécessairement en *sens inverse* du pas arrière (*fig.* 22).

La connexion de mise en série relie un faisceau retour à un faisceau aller, donc respectivement munis de numéros d'ordre pair et impair. Il en résulte aussi que le *pas avant* y_1 est toujours *impair*.

◆ **Pas résultant y.**

Il définit l'arc dont on a progressé à la surface de l'induit, lorsqu'on passe d'un faisceau d'une section quelconque au faisceau homologue de la section consécutive.

On voit immédiatement que le pas résultant y est lié aux valeurs absolues des pas y_1 et y_2 par les relations suivantes :

imbriqué :

$$y = y_1 - y_2$$

ondulé :

$$y = y_1 + y_2$$

y étant la somme ou la différence de deux nombres impairs est *nécessairement pair.*

◆ **Pas sur le collecteur.**

Les liaisons entre sections s'effectuant par le collecteur, on est amené tout naturellement à considérer l'avancement sur le collecteur, entre deux mises en série consécutives.

Les conditions de fermeture de l'enroulement imposent un avancement sur le collecteur rigoureusement identique à celui observé sur le fer ; la conséquence

immédiate en est que *le pas sur le collecteur, compté en entre-lames, est égal à la moitié du pas résultant compté en intervalles de faisceaux* :

$$y_c = \frac{y}{2}$$

REMARQUE : Il est possible de définir la valeur numérique des pas par le nombre de faisceaux (ou de lames) séparant les faisceaux (ou lames) de départ et d'arrivée, à condition de compter le faisceau (ou la lame) de départ et de ne pas compter le faisceau (ou la lame) d'arrivée.

2.334. Relations entre sens d'avancement et valeurs des pas.

Considérons d'abord un enroulement imbriqué, sur lequel le *pas avant est plus petit que le pas arrière.* Les fils de connexion sur le collecteur forment une boucle ouverte ou ganse, et, pour cette raison, ce bobinage est appelé à *spire ou section ouverte.* Le sens d'avancement sur le collecteur est le même que le sens d'exécution de la spire ; le bobinage est dit *progressif (fig. 24).*

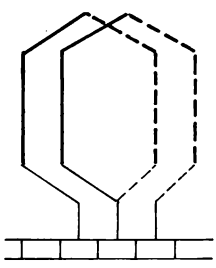


Fig. 24.

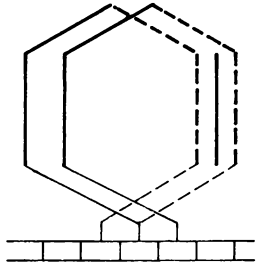


Fig. 25.

Il est possible de concevoir un schéma avec un pas avant plus grand que le pas arrière. Les fils de connexion sur le collecteur se croisent et, pour cette raison, l'enroulement est dit à *spire ou section croisée.* Il faut alors remarquer que le sens d'avancement sur le collecteur est le sens inverse d'exécution de la spire ; le bobinage ainsi constitué est un *bobinage rétrograde* (*fig.* 25).

Ces notions s'appliquent aussi au bobinage ondulé en comparant la progression sur le collecteur par rapport à la lame de départ, après avoir placé toutes les sections nécessaires pour parcourir un tour d'induit.

Sans indiquer déjà les formules rigoureuses, nous pouvons voir que si les pas y_1 et y_2 étaient rigoureusement diamétraux, c'est-à-dire égaux chacun à π/p radians, lorsqu'on les aurait reportés chacun p fois, on aurait ainsi déterminé un arc rigoureusement égal à $2p\pi/p$, soit 2 π radians et on serait revenu au point de départ.

Un bobinage ondulé sera donc progressif lorsque :

$$p(y_1 + y_2) > 2\pi$$

ou encore

$$y_1 + y_2 > \frac{2\pi}{p}$$

Il sera rétrograde lorsque : $y_1 + y_2 < \frac{2\pi}{p}$

2.34. — FERMETURE DES ENROULEMENTS

Un enroulement se ferme lorsque la sortie de la dernière section posée et l'entrée de la première section aboutissent à la même lame de collecteur, étant bien entendu que toutes les sections et toutes les lames sont utilisées.

Cette condition de fermeture, jointe au dessein d'obtenir un nombre donné de voies d'enroulements, détermine toutes les relations numériques des différents pas. Nous allons établir les différentes formules pour tous les enroulements, en utilisant les symboles suivants, valables quel que soit le type de bobinage :

z : *nombre d'encoches* de l'induit ;
k : *nombre de lames* sur le collecteur ;
S : *nombre de sections* ;
F : *nombre de faisceaux.*

Il faut remarquer que du point de vue des arcs géométriques interceptés, on peut écrire :

$$z = k = F = 2\pi$$

Si, au contraire, on cherche à établir des relations entre les nombres auxquels correspondent ces différents symboles, il faut écrire :

$$S = k ; \qquad F = 2S ; \qquad F = 2k.$$

2.341. Enroulement parallèle.

Les sections consécutives montées en série sont prises sous un même pôle ; le bobinage se referme donc, quelles que soient les valeurs des pas. Il suffit que les pas y_1 et y_2 répondent aux conditions d'imparité.

Un pas diamétral n'est possible que si la relation

$$y_1 = \frac{F}{2p} = \text{impair}$$

est satisfaite.

Dans tous les autres cas, il est nécessaire d'avoir recours à un pas raccourci, la formule consacrée se présente sous la forme :

$$y_1 = \frac{F - b}{2p}$$

b est un nombre entier tel que y_1 soit impair et assez voisin de l'arc polaire. Ce nombre b est d'autant plus élevé que le pas est plus raccourci.

EXEMPLE : *Soit un induit comportant* 39 *lames au collecteur et sur lequel on désire réaliser un enroulement bipolaire.*

Le pas diamétral a pour valeur :

$$y_1 = \frac{78}{2} = 39$$

y_1 étant impair, le bobinage à pas diamétral est possible.

Si on veut réaliser un pas raccourci de 30° électriques, la valeur de y_1 sera inférieure à 39.

150° correspondent alors à :

$$\frac{39 \times 150}{180} = 32{,}5 \text{ intervalles.}$$

On choisira de préférence 33 intervalles, ou, à la rigueur, 31.

Le calcul du pas y_1 est identique pour les enroulements simples et multiples. *Le pas y*, en revanche, *est déterminé par le nombre de voies d'enroulements.*

◆ **Enroulements simples.**

Le schéma développé nous indique qu'il faut épuiser, entre deux balais, tous les faisceaux homologues situés sous le pôle séparant les deux balais. Ce résultat est atteint en connectant les sections voisines d'où :

$$y = 2 \quad \text{et} \quad y_c = 1$$

Il ne reste plus alors qu'à calculer y_2 de façon à obtenir un bobinage progressif ou rétrograde. On obtient :

— bobinage progressif :

$$|y_2| = |y_1 - 2|$$

— bobinage rétrograde :

$$|y_2| = |y_1 + 2|$$

◆ **Enroulements multiples.**

C'est encore le schéma développé qui nous indique les conditions de réalisation.

Entre deux balais, il faut intercaler, *non plus deux voies* d'enroulement, *mais* $2q$. On peut alors considérer les différents faisceaux comme appartenant à q bobinages que l'on aurait juxtaposés en prenant d'abord le premier faisceau du premier bobinage, puis le premier faisceau du deuxième bobinage et ainsi de suite jusqu'au q ème bobinage, après quoi l'on aurait placé le deuxième faisceau du premier bobinage et ainsi de suite.

La même progression étant adoptée sur le collecteur, il en résulte évidemment que :

$$y = 2q \qquad \text{et} \qquad y_c = q$$

Signalons tout de suite qu'il est très rare d'utiliser des enroulements triples, les enroulements doubles parallèles étant déjà peu communs.

Si le nombre de faisceaux est divisible par $2a$, c'est-à-dire aussi par $2qp$, le nombre de faisceaux sera identique sur chaque voie d'enroulement et égal à :

$$f = \frac{F}{2a}$$

Après avoir parcouru, sur le collecteur, un tour complet, la sortie de la dernière section vient rejoindre l'entrée de la première section sur la même lame.

Le deuxième enroulement occupe alors les faisceaux adjacents et les lames voisines des faisceaux et lames déjà occupés par le premier enroulement.

Ainsi, pour un enroulement double on trouverait sur le collecteur :

— *premier enroulement* : 1-3-5-7-9- ... $k - 3$ $k - 1$ $k + 1$
($k + 1$ est la lame de départ n° 1) ;

— *deuxième enroulement* : 2-4-6-8 ... $k - 4$ $k - 2$ $k + 2$
(lame de départ du deuxième enroulement).

On obtiendrait ainsi deux enroulements séparés et isolés l'un de l'autre. La mise en parallèle des différentes voies se fait par les balais qui doivent théoriquement couvrir au moins q lames. Ce type d'enroulement est dit à *circuits indépendants.*

Si le nombre de faisceaux n'est pas divisible par $2a$, les nombres de faisceaux sont différents sur les voies d'enroulement. Après avoir parcouru un tour sur le collecteur pour placer le premier enroulement, la sortie de la dernière section ne retombe pas sur la lame de départ, mais en avant ou en arrière de cette lame. Le nouveau tour s'effectue à partir de cette lame, et c'est seulement au dernier tour que la dernière section viendra se connecter sur la lame ayant reçu le départ de la première section du premier tour. Toutes les sections sont donc reliées électriquement et on obtient ainsi un *enroulement multiple à un seul circuit.*

Il est encore possible d'envisager théoriquement un troisième cas ; c'est celui dans lequel k, sans être divisible par q, comporte quand même un diviseur commun avec q. Dans ce cas les $2qp$ voies d'enroulement sont obtenues avec un nombre de circuits indépendants égal au P.G.C.D. de k et q. Par exemple, il serait possible de concevoir un tel schéma avec les valeurs suivantes :

$$k = 166 \qquad \text{et} \qquad q = 4$$

Il y aurait deux circuits indépendants comportant chacun la moitié des voies d'enroulement.

REMARQUE. — Les formules précédentes sont valables intégralement pour les induits dont les encoches ne contiennent qu'une section (soit un faisceau aller et un faisceau retour), autrement dit lorsque le nombre de lames est égal au nombre d'encoches sur le fer.

En réalité, il arrive très fréquemment que chaque encoche de l'induit contienne plusieurs sections et alors le nombre d'encoches est un sous-multiple du nombre de lames. Il est alors pratique de préparer simultanément, sur le même gabarit, et d'isoler ensemble les différentes sections entrant dans la même encoche. Il en résulte que le pas y_1 ne peut plus être calculé arbitrairement. Il doit en effet avoir une valeur telle que chaque côté de la bobine comprenant plusieurs sections soit tout entier dans la même encoche. Les deux faisceaux d'une section quelconque doivent alors occuper, dans chacune des encoches, des positions homologues par rapport aux flancs de l'encoche, ce qui entraîne pour le pas arrière la valeur :

$$y_1 = y_f \times 2\,\frac{S}{z} + 1$$

EXEMPLE : *Soit un induit bipolaire à 27 encoches et 3 sections par encoches. Le pas le plus voisin de la valeur diamétrale est égal sur le fer à 1-14 d'où la valeur du pas arrière :*

$$y_1 = 13 \times 6 + 1 = 79$$

La formule tenant compte uniquement du nombre de faisceaux nous aurait conduits à la valeur suivante :

$$y_1 = \frac{27 \times 6}{2} = 81$$

On peut encore remarquer que, pour obtenir un pas rigoureusement diamétral, le nombre d'encoches doit être multiple du nombre de pôles, et que, dans ces conditions, le pas sur le fer, compté en dents séparant les encoches, a pour valeur :

$$y_f = \frac{z}{2p}$$

Chaque bobine occupe alors deux encoches dont les numéros d'ordre sont séparés de $z/2p$. Par exemple, avec un induit bipolaire à 32 encoches, un pas rigoureusement diamétral est possible, en donnant au pas sur le fer la valeur :

$$y_f = \frac{32}{2} = 16$$

ce qui revient à dire qu'une bobine occupe les encoches 1-17.

2.342. Enroulement série.

Nous avons vu que dans les enroulements imbriqués simples, le fait de prendre successivement toutes les bobines placées sous un même pôle conduit à une voie d'enroulement formée par les bobines présentant leurs faisceaux aller sous ce pôle et leurs faisceaux retour sous le pôle voisin. Dans l'enroulement simple, on a donc autant de voies d'enroulement que de pôles.

Partant de cette remarque, on peut émettre l'idée suivante : au lieu de connecter d'abord en série toutes les sections placées sous le même pôle, on peut connecter en série des sections prises successivement sous des pôles de même nom en avançant toujours dans le même sens sur l'induit et sur le collecteur, de façon que les f.é.m. s'ajoutent pour les sections ayant leurs faisceaux aller sous tous les pôles de même nom et constituent une seule voie d'enroulement. Les autres sections, ayant leurs faisceaux aller situés sous les pôles de nom contraire, sont le siège de f.é.m. en opposition avec les premières et constituent la seconde voie d'enroulement.

Nous avons déjà fait remarquer qu'au bout du premier tour parcouru sur le collecteur, il ne faut pas retomber sur la lame de départ, mais sur la lame voisine. Le pas sur le collecteur a été reporté p fois par tour, tandis que sur l'induit les faisceaux connectés au premier tour sont distants alternativement du pas y_1 et du pas y_2. On trouve pour chaque tour : p fois le pas y_1 et p fois le pas y_2. C'est de cette propriété que sont tirées les formules suivantes :

$$p y_c = k \pm 1$$
$$p(y_1 + y_2) = \mathrm{F} \pm 2$$

En remarquant que $y_1 + y_2 = y$ on conclut immédiatement :

$$y_c = \frac{k \pm 1}{p}$$
$$y = \frac{\mathrm{F} \pm 2}{p}$$

Comme dans tous les enroulements, y_1 et y_2 doivent être impairs, et on se trouve devant deux possibilités :

$y_1 = y_2$ (cas où y est multiple de 2 seulement) ;

$y_1 \neq y_2$ (cas où y est multiple de 4).

L'examen des formules montre que le nombre de lames ne peut pas être quelconque. D'autres conséquences découlent des propriétés mathématiques des différentes relations.

Examinons la relation de base :

$$p y_c = k \pm 1$$

Nous voyons que k n'est divisible ni par p, ni par y_c ; le reste de la division est égal à 1, $p - 1$, ou $y_c - 1$. La première conséquence importante est que :

— k doit être premier avec p ;

— k doit être premier avec y_c.

Le nombre de sections par encoche S/z (soit la moitié du nombre de faisceaux par encoche F/z) est un sous-multiple du nombre de sections S et de K (k = S) ; il est donc également premier avec p et avec y_c.

Remarquons aussi que z est sous-multiple de k et qu'il doit être également premier avec p et y_c.

En conclusion, lorsqu'il s'agit de choisir les caractéristiques d'un induit à bobinage ondulé série, il faut satisfaire aux conditions suivantes :

— k premier avec p et y_c ;

— S/z premier avec p et avec y_c ;

— z premier avec p et avec y_c ;

— $py_c = k \pm 1$.

On voit donc qu'il n'est pas possible, a priori, de choisir les valeurs de k, S/z, z et p indépendamment les unes des autres. Le *tableau* I indique les possibilités pour les cas les plus courants.

Il peut se faire, dans quelques rares cas, que le nombre d'encoches de l'induit et le nombre de sections par encoches soient imposés, et que ces nombres ne soient pas compatibles avec la réalisation d'un enroulement série. On a alors recours à l'emploi de sections mortes. Le pas et le nombre de lames au collecteur sont choisis pour que l'enroulement soit possible avec un nombre de sections total inférieur au nombre de sections logées dans les encoches, mais aussi voisin que possible. Les sections inutiles sont quand mêmes mises en place, mais non raccordées au collecteur. Elles ne sont nécessaires que pour garnir l'encoche et faciliter l'équilibrage mécanique de l'induit.

EXEMPLE : *Soit un induit comportant* 68 *encoches et* 3 *sections par encoche, sur lequel on désire réaliser un enroulement série tétrapolaire. Le nombre de sections est égal à* 68×3 *soit* 204. *L'application de la formule donnant le pas y conduit :*

$$y = \frac{408 \pm 2}{2}$$

soit 205 ou 203, ce qui est contraire à la condition de parité du pas y.

On supprime alors une section active et le pas y devient :

$$y = \frac{406 \pm 2}{2}$$

soit 204 ou 202.

TABLEAU I

Valeurs permettant les enroulements série sans section morte.

zp	p	S/z (1)	Conditions nécessaires pour z et valeurs possibles	Condition nécessaire pour k et valeurs possibles
4	2	1 3 5	Tous les nombres impairs.	*Tous les nombres impairs.*
6	3	1 2 4 5	Tous les nombres premiers avec 3.	*Tous les nombres premiers avec* 3.
8	4	1 3 5	Tous les nombres impairs.	*Tous les nombres impairs divisibles par* S/z.
10	5	1 2 3 4	Déterminé par les valeurs possibles de k et divisibles par S/z (2).	*Nombres premiers avec* p *et se terminant par* 1, 4, 6, 9. Ex. : 491, 564, 716, 899... etc.
12	6	1	Avec S/z = 1 : tous les nombres premiers avec 6 et situés de part et d'autre des multiples de 6. Ex. : 95-97, 101-103, 179-181, 239-241.	*Déterminé par les valeurs possibles pour* z *en fonction de* S/z.
		5	Avec S/z = 5 : tous les nombres premiers avec 6.	

(1) On n'a pas envisagé le cas où S/z est > 5, ce qui est pratiquement inexistant.

(2) Exemples : Avec S/z = 2, k doit être pair et premier avec p. Avec S/z = 3, k peut prendre les valeurs... 564, 576, 591, 594...

Le collecteur ne devra comporter que 203 lames de telle sorte que la relation :

$$y_c = \frac{k \pm 1}{2}$$

soit satisfaite.

On obtient bien, dans ce cas :

$$y_c = \frac{203 \pm 1}{2}$$

soit 102 ou 101, ce qui représente bien la moitié du pas y.

L'emploi de sections mortes permet de réaliser un enroulement qui, autrement, ne serait pas possible, mais on comprend facilement que dans le cas de sections comportant quelques spires seulement, et à plus forte raison une seule spire, on éprouve quelques difficultés à réaliser les connexions au collecteur ; aussi l'emploi de sections mortes doit être exceptionnel.

2.343. Enroulement série parallèle.

On passe aisément de l'enroulement série à l'enroulement série parallèle, en procédant de la même façon que pour passer de l'enroulement parallèle simple à l'enroulement parallèle multiple.

Pour l'enroulement série simple, nous avions adopté un pas y_c tel que :

— *au bout d'un tour sur le collecteur*, la lame d'arrivée était voisine de la lame de départ ;

— *au bout de* t *tours*, le retour de la dernière section était connectée sur la lame de départ du premier tour, toutes les lames ayant été épuisées.

Pour obtenir un enroulement série multiple permettant de former $2a$ voies d'enroulements, il suffit de juxtaposer a enroulements série, de telle sorte que sur le collecteur les lames appartiennent successivement à chacune des voies d'enroulement :

première voie ;
deuxième voie ;
..... ;
(a — 2) ème voie ;
(a — 1) ème voie ;
(a) ème voie ;
première voie ;
.....

Il en résulte qu'au bout du premier tour le faisceau retour de la $p^{ème}$ section sera connecté à la $a^{ème}$ lame, avant ou après la lame de départ.

D'où les formules de pas suivantes :

$$y_c = \frac{k \pm a}{p}$$

$$y = 2y_c = \frac{F \pm 2a}{p}$$

y_1 et y_2 sont impairs et sensiblement égaux à $y/2$.

Bien qu'il soit théoriquement possible d'imaginer un enroulement série parallèle dans lequel p et a soient rigoureusement indépendants l'un de l'autre, la

pratique a montré que seuls les enroulements dans lesquels le rapport p/a est entier, autrement dit lorsque a est diviseur de p, conduisent à un fonctionnement satisfaisant.

Nous n'examinerons donc que le cas des enroulements série parallèle dans lesquels a est diviseur de p.

Reprenons la relation entre pas et nombre de lames :

$$py_c \pm a = k$$

Puisque a est diviseur de p, nous pouvons remplacer p par sa valeur exprimée en fonction de a, soit ad ; dans ces conditions, la relation peut s'écrire :

$$a(dy_c \pm 1) = k$$

et l'on s'aperçoit que k est un multiple de a. Chaque voie d'enroulement comporte alors le même nombre de lames, et les forces électro-motrices y induites sont bien équilibrées.

Comme pour les enroulements parallèles multiples, les enroulements série parallèle peuvent se fermer sur un seul ou plusieurs circuits. On voit immédiatement quelles sont, pour les différents cas, les conditions à réaliser :

— *k est premier avec* y_c : *l'enroulement se ferme en un seul circuit* ;

— *k et* y_c *admettent un diviseur commun : le nombre de circuits indépendants est égal au P.G.C.D. de* y_c *et de* k.

Comme pour les enroulements série, l'emploi des sections mortes est peu recommandable, et il s'ensuit que certaines relations doivent exister entre les nombres k, y_c, z, a, p et S/z.

Considérons la relation déjà établie :

$$py_c \pm a = k = S$$

a étant diviseur de p, nous pouvons écrire :

$$\frac{p}{a} y_c \pm 1 = \frac{S}{a} = \frac{k}{a} = \frac{S}{z} \times \frac{z}{a}$$

De cette nouvelle relation, il ressort, en appliquant les propriétés des nombres premiers et des produits de facteurs :

— S/z premier avec p/a et avec y_c ;

— k/a premier avec y_c et avec p/a ;

— z/a est entier (k/a entier par hypothèse et S/z entier par nécessité).

Le *tableau* II indique quelques-unes des solutions possibles pour la réalisation des enroulements série parallèle sans section morte.

TABLEAU II. — *Valeurs permettant les enroulements série parallèle sans section morte.*

Valeurs de		$2a = 4$ $a = 2$			$2a = 6$ $a = 3$			$2a = 8$ $a = 4$			$2a = 10$ $a = 5$			$2a = 12$ $a = 6$		
$2p$	p	p/a	S/z	z	p/a	S/z	z	p/a	S/z	z	p/a	S/z	z	p/a	S/z	z
4	2	1	1, 2, 3, 4, 5	pair												
6	3				1	1, 2, 3, 4, 5	multiple de 3									
8	4	2	1, 3, 5	pair non multiple de 4				1	1, 2, 3, 4, 5	multiple de 4						
10	5										1	1, 2, 3, 4, 5	multiple de 5			
12	6	3	1, 2, 4, 5	pair non multiple de 6	2	1, 3, 5	multiple de 3 et impair							1	1, 2, 3, 4, 5	multiple de 6
16	8	4	1, 3, 5	pairs situés de part et d'autre des multiples de 8				2	1, 3, 5	multiple de 4, non multiple de 8						

2.35. — CONNEXIONS ÉQUIPOTENTIELLES

Considérons le schéma d'un enroulement multipolaire. Dans chacune des voies d'enroulement, les lames occupant des positions homologues par rapport aux balais sont au même potentiel, telles les lames 2 et 8, 10 et 16 (*fig.* 26).

Au cours de la rotation, les lames homologues situées sur des voies d'enroulement différentes conservent leur égalité de potentiel. C'est le cas des lames 8 et 16,6 et 14,4 et 12, etc. Il est donc possible de relier ces lames par des conducteurs sans troubler le fonctionnement de la machine. La première conséquence visible est assez facile à découvrir ; les sections en commutation sont reliées en parallèle par les connexions établies entre balais de même polarité, et, comme les connexions équipotentielles relient également ces sections, il devient possible, en principe, de ne laisser subsister sur le collecteur que deux balais de nom opposé et de supprimer tous les autres. Dans la pratique, cette possibilité n'est pas exploitée, à cause des difficultés de commutation qui résulteraient du passage du courant total sous deux balais seulement.

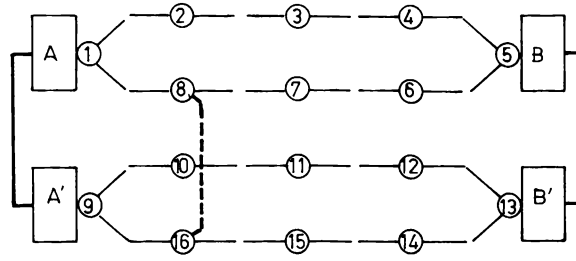


Fig. 26.

En fait, les équipotentielles sont utilisées dans un but très différent. Nous avons déjà, à plusieurs reprises, insisté sur la nécessité d'obtenir des voies d'enroulement très bien équilibrées en tension. Le moindre déséquilibre entraîne des courants de circulation à l'intérieur de la machine dirigés de la voie ayant la plus grande force électro-motrice vers celles ayant les plus faibles forces électromotrices, et d'une valeur telle que l'égalité des tensions soit rétablie sur toutes les voies. Ces courants se referment nécessairement par les balais et les enroulements, et ils ont l'inconvénient de rendre la commutation plus délicate. Les connexions équipotentielles, en permettant directement l'échange des courants de circulation de section à section, évitent leur passage sous les balais. Nous verrons sur les exemples d'application donnés plus loin que les équipotentielles doivent relier les lames situées sur le collecteur à $360/p$ degrés géométriques l'une de l'autre, soit :

— 180° pour une machine à 4 pôles ;

— 120° pour une machine à 6 pôles ;

— 90° pour une machine à 8 pôles...

L'expérience a montré qu'elles étaient d'autant plus efficaces que l'enroulement était déjà plus symétrique. Dans des enroulements bien équilibrés, il est d'ailleurs courant de ne pas disposer des équipotentielles à toutes les lames, mais seulement toutes les deux ou trois lames et assez souvent de telle sorte qu'une seule section par encoche en soit munie. On admet couramment une section de fil égale au dixième de la section des spires.

2.36. — ENROULEMENTS SPÉCIAUX

En plus des enroulements imbriqués et ondulés déjà examinés et qui sont les plus répandus, on peut utiliser sur certains induits des enroulements plus ou moins particuliers.

2.361. Enroulement à deux collecteurs.

Pour des intensités très élevées on peut prévoir un collecteur à chaque extrémité du bobinage de l'induit de façon à pouvoir doubler le nombre de lignes de balais. Le réglage de la charge et la commutation ne sont satisfaisants que lorsque chacun des collecteurs reçoit un enroulement série avec $a = p$ et disposés de telle sorte que chaque encoche contienne des faisceaux reliés aux deux collecteurs. Cette condition est réalisée pour un nombre pair d'encoches par pôle et des pas y_1 et y_2 égaux. Des connexions équipotentielles sont prévues sur chaque enroulement.

2.362. Enroulements à conducteurs dédoublés.

Les sections sont composées de deux spires en parallèle ayant chacune un pas différent. Elles sont logées dans des encoches différentes.

2.363. Enroulements mixtes ou à pattes de grenouille (*fig.* 26 *bis*).

Ils sont obtenus en reliant au même collecteur un enroulement imbriqué et un enroulement ondulé du type série parallèle à 2 p voies d'enroulements.

Des considérations relatives à la commutation conduisent à adopter des enroulements série parallèle à un seul circuit avec un nombre d'encoches par pôle égal au nombre de phases.

En appelant q le nombre de phases, on obtient :

$$y_c = \frac{k \pm p}{p} = \frac{k}{p} \pm 1$$

$$z = 2aq = 2pq$$

Les lames auxquelles sont reliées les extrémités d'une section ondulée sont presque au même potentiel puisqu'elles ne diffèrent que de la f.é.m. d'une

spire imbriquée. La spire ondulée ayant elle-même une f.é.m. équivalente à celle d'une spire, on voit ainsi que les sections ondulées servent d'équipotentielles aux sections imbriquées.

Ces enroulements sont utilisés en courant alternatif.

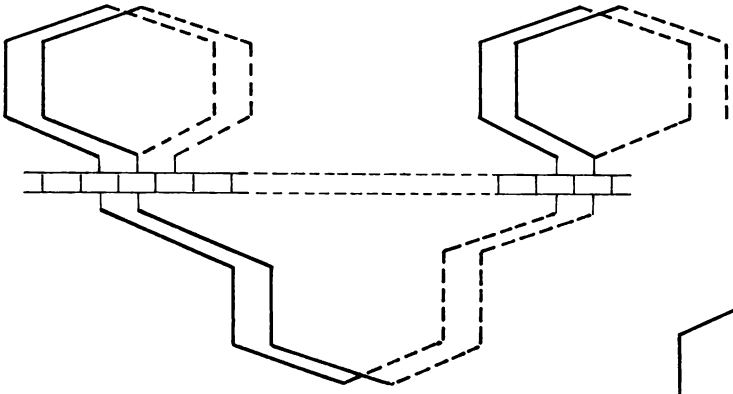


Fig. 26 bis.

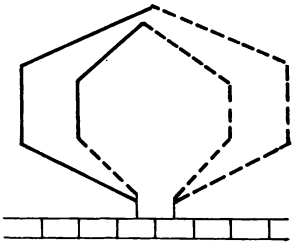


Fig. 26 ter.

2.364. Enroulement amortisseur (*fig.* 26 *ter*).

Afin d'amortir les pulsations à haute fréquence dans les induits à courant alternatifs (moteur Schrage en particulier) on dispose, en parallèle sur l'enroulement à collecteur à pas normal, un enroulement à pas raccourci. Les nombres de spires sont généralement différents par rapport aux sections principales, et quelquefois une ou plusieurs spires sont en alliage résistant.

3. Exemples d'application

Nous allons examiner quelques schémas parmi les types les plus couramment utilisés, en indiquant, du moins pour les premiers exemples, les variantes possibles pour un même nombre de phases et une même polarité.

3.1. — ENROULEMENTS SANS COLLECTEUR

3.11. — ENROULEMENTS MONOPHASÉS

Nous avons déjà exposé les raisons pour lesquelles le bobinage occupait au maximum les deux tiers de l'entrefer. La *figure* 27 représente un enroulement bipolaire en projection frontale. Le développement panoramique et le schéma développé correspondants font l'objet des *figures* 28, 29 et 30.

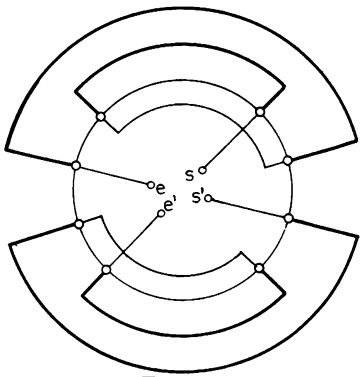


Fig. 27

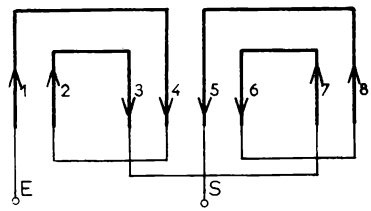


Fig. 28.

Il est déjà bon de procéder sur cet exemple très simple à un certain nombre de remarques qui seront valables par la suite, sur la plupart des schémas :

— les *flèches représentent les sens des courants* à un instant donné ;

— le *couplage série représenté sur la figure* 28 a été réalisé à l'intérieur du bobinage, de façon à ne laisser que deux conducteurs auxquels on applique la tension du secteur ;

— le *couplage en deux circuits parallèles*, représenté sur la *figure* 29, peut également être effectué à l'intérieur du bobinage, ce qui, a priori, interdit de connaître le couplage des bobines sans démontage de la machine ;

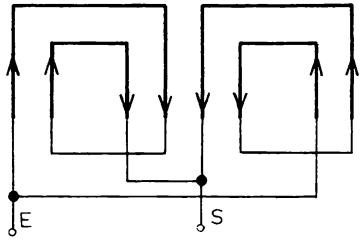


Fig. 29.

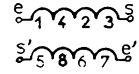


Fig. 30.

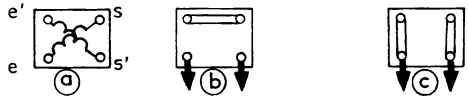


Fig. 31.

a. Connexion sur la plaque à bornes.
b. Couplage série tension 2 U.
c. Couplage parallèle tension U.

— le *couplage série ou parallèle* peut s'obtenir plus facilement sur une plaque à bornes, les extrémités des deux circuits étant disposées comme l'indique la *figure* 31.

Suivant la terminologie énoncée précédemment, cet exemple concerne un bobinage par pôle et chaque groupe de bobines comprend deux bobines concentriques.

◆ **Enroulement tétrapolaire.**

Différentes variantes sont représentées sur les *figures* 32 *à* 36 :

— *bobinage enchevêtré* par bobines simples en projection frontale (*fig.* 32) ;

— *développement panoramique* enchevêtré par bobines simples (*fig.* 33). Ces deux dessins concernent la même disposition et on voit qu'il s'agit d'un bobinage par pôle avec 4 groupes de bobines pour 4 pôles ;

— *bobinage par pôle à bobines* concentriques en développement panoramique et en projection frontale (*fig.* 34 et 35) ;

— *bobinage à pôles conséquents* en projection frontale et développement panoramique (*fig.* 36 et 37).

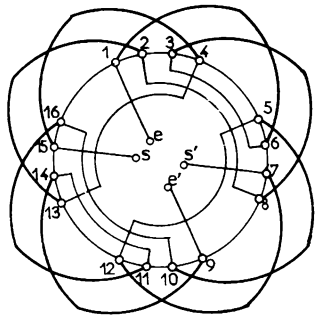


Fig. 32.

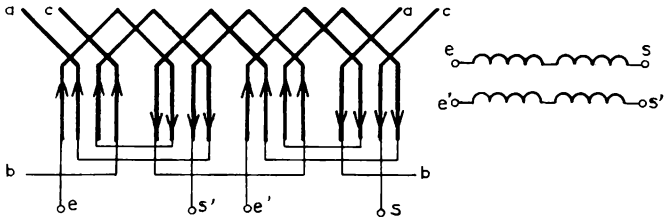


Fig. 33.

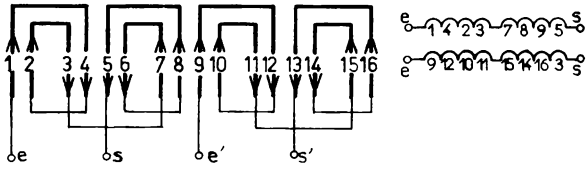


Fig. 35.

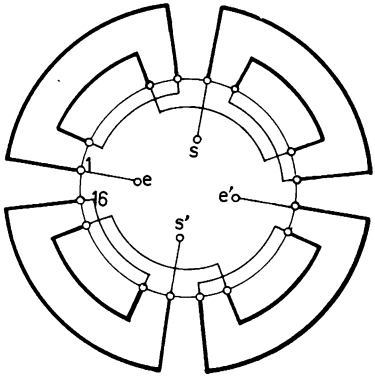


Fig. 34.

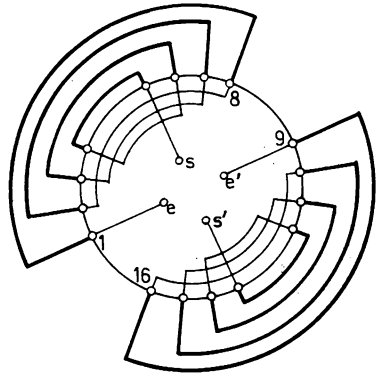


Fig. 36.

Les schémas développés sont également représentés pour chacun de ces enroulements.

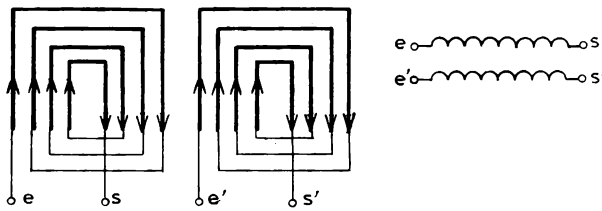


Fig. 37.

3.12. — ENROULEMENTS BIPHASÉS

Ce type d'enroulement a totalement disparu en tant que bobinage destiné à être alimenté par un réseau biphasé (1). On l'utilise seulement sur les petites machines monophasées munies d'un condensateur de démarrage.

L'enroulement est réparti sur tout l'entrefer, mais il arrive que la phase auxiliaire occupe moins d'encoches que la phase de travail.

La *figure* 38 montre l'application de ce schéma à un stator 16 encoches, 4 pôles. La phase principale, ou de travail, est tracée en trait plein, tandis que la phase auxiliaire, ou de démarrage, est tracée en trait pointillé.

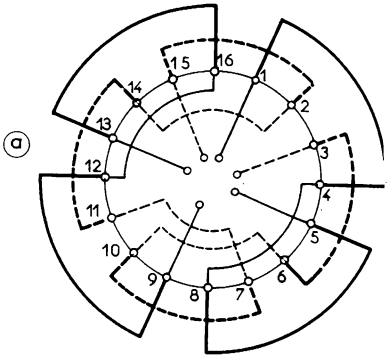
Les couplages à la plaque à la borne sont indiqués sur les *figures* 39.

La *figure* 40 représente un bobinage également tétrapolaire, mais dans lequel les phases sont étalées. On remarquera que certaines encoches contiennent à la fois des fils des deux phases.

Signalons aussi qu'il est possible d'utiliser pour une alimentation monophasée, un véritable bobinage triphasé à condition de lui adjoindre un condensateur suivant les schémas des *figures* 41. Il est alors possible d'utiliser le moteur soit en monophasé, soit en triphasé, mais la puissance est évidemment différente dans ces deux cas.

---

(1) C'est volontairement que nous avons ignoré les quelques îlots subsistant encore... à Paris, et alimentés en biphasé! La plupart des usagers préfèrent d'ailleurs installer un transformateur Scott et utiliser des moteurs triphasés.



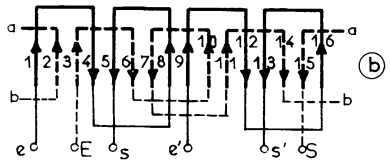


Fig. 38.

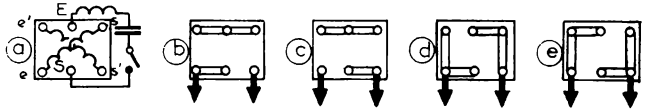


Fig. 39.

a. Connexion sur la plaque à bornes. *b.* Couplage série, sens de rotation 1. *c.* Couplage série, sens de rotation 2. *d.* Couplage parallèle, sens de rotation 1. *e.* Couplage parallèle, sens de rotation 2.

Remarquer que l'ensemble phase auxiliaire-condensateur est toujours alimenté sous la même tension.

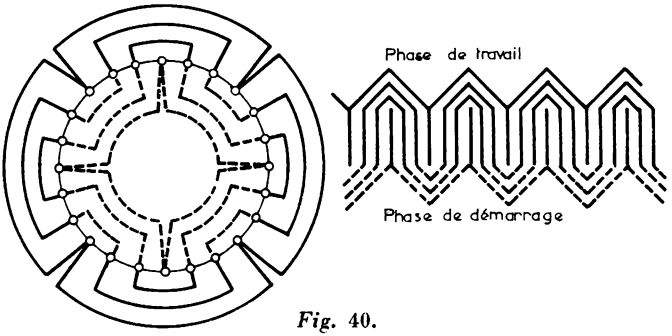
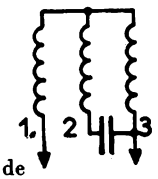


Fig. 40.



Pour inverser le sens de rotation connecter le condensateur entre 1 et 2.

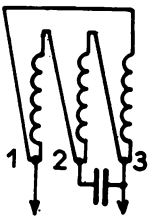


Fig. 41.

3.13. — ENROULEMENTS TRIPHASÉS

Nous examinerons seulement quelques schémas choisis parmi des nombres de pôles et des nombres d'encoches faibles, à cause de la difficulté d'ordre graphique qui résulterait de la représentation de schémas avec de nombreuses bobines. La conception de schémas différents ne présente cependant pas plus de difficultés de raisonnement si on veut bien appliquer les règles générales déjà énoncées.

3.131. Enroulements à fils à nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Ces bobinages sont les seuls employés pour les stators de petite puissance, et c'est assez dire l'importance qu'ils revêtent.

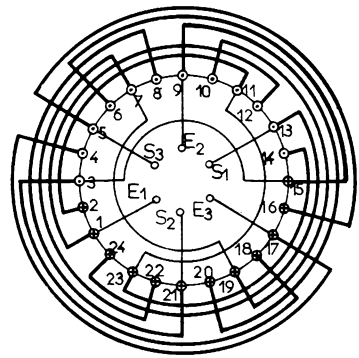


Fig. 42.

◆ **Bobinage bipolaire à pas diamétral.**

L'exemple choisi sur la *figure* 42 comprend 24 encoches. Les trois phases concourant à la formation de chaque pôle, les encoches sont réparties identiquement à raison de 12 encoches par pôle et de 4 encoches pour chaque phase sous chaque pôle.

Les entrées doivent être décalées d'un angle géométrique

$$\alpha = \frac{2\pi}{3p} \text{ soit } 120^{o}$$

Les *figures* 42 et 43 représentent respectivement la projection frontale et le développement panoramique de ce bobinage disposé sur trois plans. Pour obtenir une répartition équitable des chignons dans l'entrefer, on remarque qu'il est nécessaire d'adopter deux groupes de bobines par phase, ce qui conduit obligatoirement à un bobinage du type par pôle.

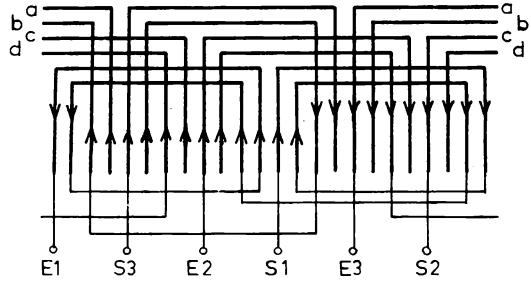


Fig. 43.

Le premier plan est constitué par les bobines 1-12, 2-11, 13-24, 14-23. Le deuxième plan occupe les bobines 9-20, 10-19, 21-7, 22-6, et le troisième plan les bobines restantes soit : 5-16, 6-15, 17-24, 18-3.

Chacun de ces plans constitue une phase complète et c'est là une conclusion générale.

Dans un bobinage à plans, par pôles, il est nécessaire de prévoir trois plans, et chaque phase occupe un plan tout entier, soit 2p *groupes de bobines concentriques.*

La *figure* 44 représente également un enroulement bipolaire, mais avec chignons enchevêtrés par bobines simples, tandis que la *figure* 45 représente toujours le même bobinage mais cette fois enchevêtré par demi-bobines. Sur ce dernier schéma une phase a été tracée en trait plus épais, pour en faciliter la lecture.

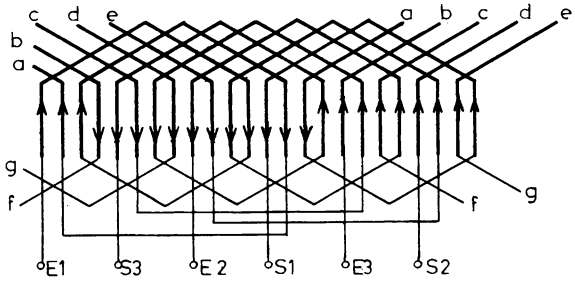


Fig. 44.

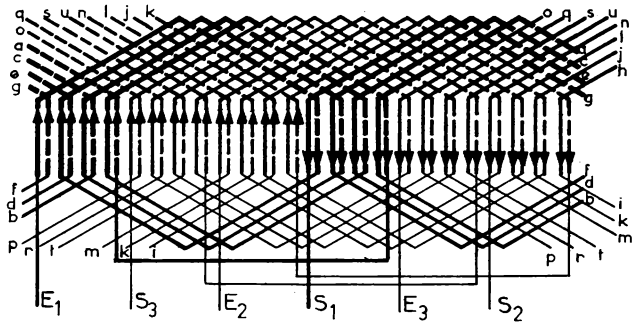


Fig. 45.

Enroulement bipolaire 24 encoches enchevêtré par demi-bobines, pas diamétral 1-13. Couplage série.

La liaison des entrées et sorties des trois phases se fait en respectant le schéma de la *figure* 46 valable d'ailleurs pour tous les bobinages triphasés. Cette disposition permet le couplage soit en étoile, soit en triangle.

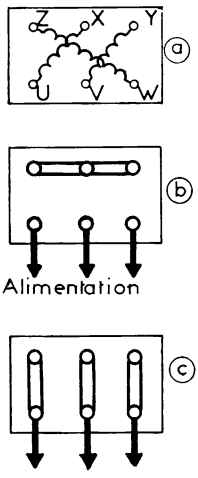


Fig. 46.
a. Connexions sur la plaque à bornes.
b. Couplage étoile.
c. Couplage triangle.

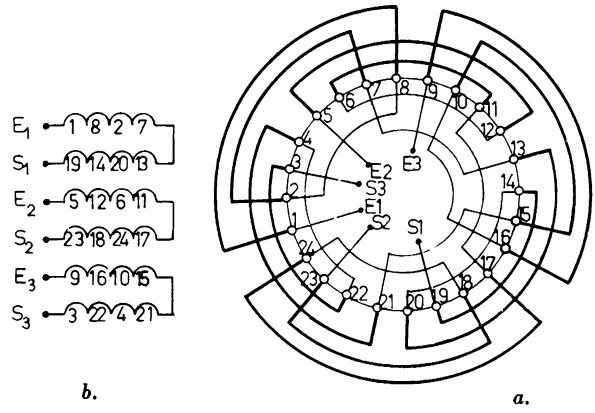


Fig. 47.
a. Projection frontale.
b. Schéma développé.

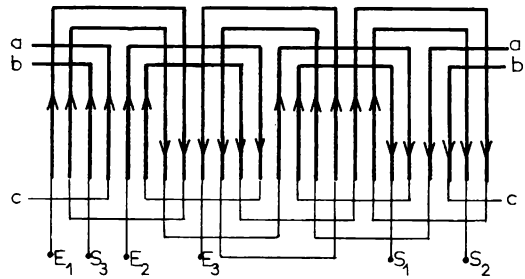


Fig. 48.

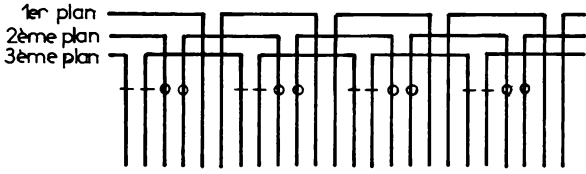
◆ **Enroulement tétrapolaire.**

Il est représenté en projection frontale sur la *figure* 47 et en développement panoramique sur la *figure* 48 dans une disposition sur deux plans.

Il faut remarquer que cette disposition conduit à six groupes de bobines, donc à deux groupes par phase et il s'agit donc d'un enroulement à pôles conséquents. Chaque phase est formée par deux groupes appartenant chacun à des plans différents et nous arrivons là encore à une conclusion générale.

En disposant un bobinage triphasé sur deux plans, on obtient obligatoirement un bobinage à pôles conséquents et chaque phase comprend des groupes pris dans chaque plan.

Les dispositions des chignons permettant d'obtenir un enroulement sur trois plans ou un enroulement enchevêtré sont indiquées respectivement sur les *figures* 49 et 50.



Le lecteur terminera le schéma en conservant la même position des entrées que sur la figure 50.

Fig. 49.

Remarquer que les chignons d'une même phase sont disposés sur le même plan. Le lecteur terminera le schéma.

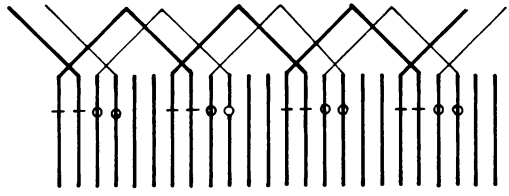


Fig. 50.

L'examen du schéma développé (*fig.* 46) permet de constater l'identité complète entre les trois phases. On voit, en effet, que les numéros des encoches occupées par les bobines de la phase 2 s'obtiennent en ajoutant le nombre 4 aux numéros des encoches homologues de la phase 1. Cet écart de 4 encoches représente par ailleurs le décalage géométrique correspondant à un déphasage électrique de 120°.

REMARQUE. A propos de l'enroulement tétrapolaire, certains ouvrages élémentaires font remarquer que les entrées peuvent être décalées, soit d'un angle égal à 60° géométriques, soit d'un angle géométrique de 120°. D'après la théorie générale que nous avons énoncée, un décalage de 120° géométriques doit correspondre à un déphasage électrique de $120p$ soit 240° ou $4\pi/3$. On obtient ainsi un système triphasé dont les équations sont de la forme :

$$i_1 = I_{max} \sin \omega t$$
$$i_2 = I_{max} \sin (\omega t - 4\pi/3)$$
$$i_3 = I_{max} \sin (\omega t - 8\pi/3).$$

L'angle $8\pi/3$ étant supérieur à 2π, ses lignes trigonométriques sont égales à celles de l'angle $8\pi/3 - 2\pi$ soit $2\pi/3$, et on peut écrire :

$$i_3 = I_{max} \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

On retrouve bien les équations du système triphasé, à cette différence près que les phases 2 et 3 sont inversées.

Cette remarque n'est pas seulement valable pour l'enroulement tétrapolaire ; elle est absolument générale et peut s'énoncer sous la forme suivante :

Il est possible, dans un enroulement triphasé, de décaler les entrées d'un angle géométrique conduisant à des déphasages électriques de 240°. *Le champ tournant ainsi obtenu est inversé par rapport à celui délivré par un système triphasé à entrées déphasées de* 120°, *par suite de la permutation de deux phases.*

Dans le cas particulier où $p = 1$ (bobinage bipolaire), une entrée étant fixée, il y a dans tout l'entrefer une seule position pour les deux autres et cette remarque est alors sans intérêt.

◆ **Enroulement hexapolaire** (*fig.* 51).

Comme pour les enroulements précédents, il est possible d'envisager, soit une disposition à chignons enchevêtrés, soit une disposition sur deux ou trois plans. Dans le cas de la disposition sur deux plans, on obtient un bobinage à pôles conséquents, ce qui nécessite la répartition des bobines sur $3p$ groupes, soit 9 groupes. 9 n'étant pas divisible par 2, il n'est donc pas possible de répartir ces 9 groupes sur deux plans et on prévoit un groupe mixte dont les chignons passent d'un plan à l'autre.

Cette disposition se retrouve d'ailleurs chaque fois que le nombre de groupes est impair, c'est-à-dire chaque fois que p *est impair :* 3, 5, 7, *etc.*

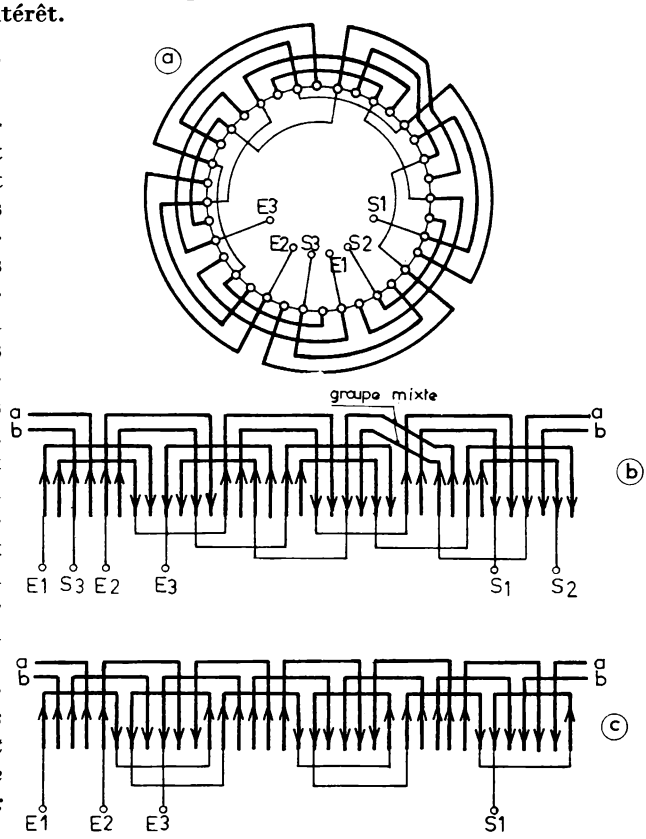


Fig. 51. — *a.* Projection frontale, bobinage sur deux plans.
b. Développement panoramique sur deux plans.
c. Développement panoramique sur trois plans.

Fig. 51.

Voir aussi photo page 67.

◆ **Généralisation de la méthode de tracé des schémas.**

Les trois exemples précédents nous ayant familiarisé avec les différentes dispositions des bobines, nous allons indiquer la marche à suivre pour aboutir rapidement au tracé du schéma pour tout bobinage à nombre entier d'encoches par pôle et par phase et dont le pas est diamétral ou quasi diamétral (*fig.* 52).

— Tracé des encoches, à raison d'un trait par encoche.

— Tracé des flèches représentant le sens du courant à un instant donné, de façon à faire apparaître les différents pôles. Chaque pôle comprend *obligatoirement* z/2p *encoches.*

— Répartition des encoches par phase en attribuant à *chaque phase des nombres égaux d'encoches sous chaque pôle, soit* z/3 × 2p *ou* z/6p.

— Mise en place des chignons de façon à *relier ensemble des encoches appartenant à la même phase sous des pôles voisins.* La disposition de ces chignons devra tenir compte du mode de bobinage adopté. On devra faire apparaître, pour chaque phase, p *groupes de bobines s'il s'agit d'obtenir un bobinage à* 2 *plans, et* 2p *groupes de bobines s'il s'agit d'un bobinage sur* 3 *plans.*

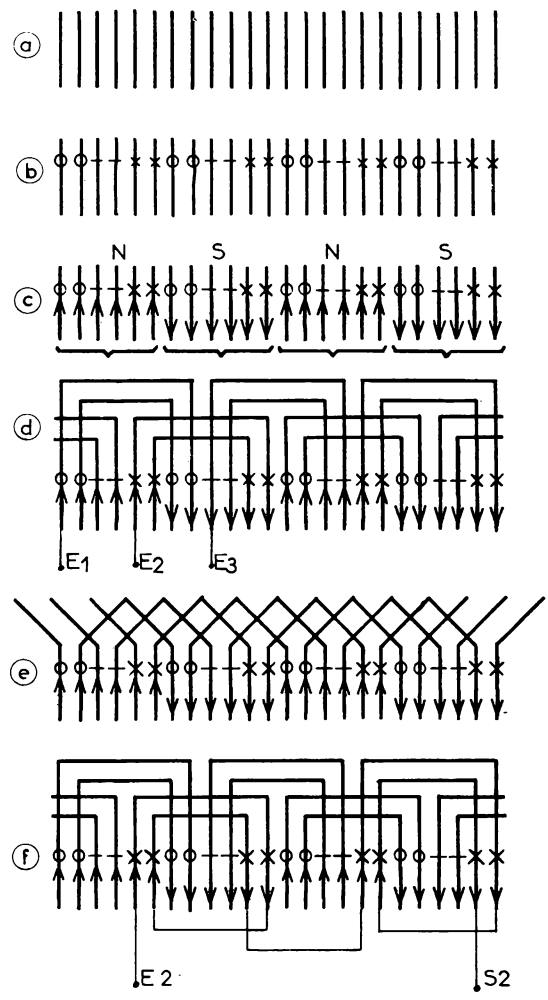


Fig. 52.

a. Tracé des encoches. *b.* Répartition des encoches. *c.* Sens de courant. *d.* Mise en place des chignons (bobinage sur 2 plans) et mise en place des entrées. *e.* Mise en place des chignons (bobinage enchevêtré). *f.* Connexion d'une phase.

Le lecteur complétera le schéma en suivant les indications du texte.

Le bobinage *enchevêtré* ne pourra s'obtenir qu'avec un pas *impair*, compté en *intervalles*. Ceci conduit, sur le schéma, à diriger les chignons voisins dans deux sens différents.

— Mise en place des entrées avec un décalage géométrique compté en encoches, égal à

$$\frac{z}{p} + k\,\frac{z}{p}\ (k \text{ nombre entier}).$$

— Mise en place des connexions pour une phase.

— Tracé du schéma développé des 3 phases, en reproduisant pour chaque phase un tracé identique à celui de la première mais dont les numéros des encoches sont séparés par le décalage des entrées.

3.132. Enroulements à pas raccourci.

On ne peut réaliser un pas raccourci qu'*en diminuant la distance qui sépare les encoches appartenant à la même phase sous des pôles voisins.* Comme cet intervalle est utilisé pour loger les deux autres phases, le bobinage à pas raccourci n'est concevable que dans la mesure où des encoches reçoivent des fils appartenant à deux phases différentes, donc avec des bobinages enchevêtrés par demi bobine. Dans quelques rares cas, il est encore possible de réaliser des pas raccourcis avec des bobinages enchevêtrés par bobines simples. La *figure* 53 en donne l'application à un enroulement bipolaire 24 encoches avec un pas 1-10 au lieu de 1-12 et la *figure* 54 concerne un enroulement 4 pôles 36 encoches avec

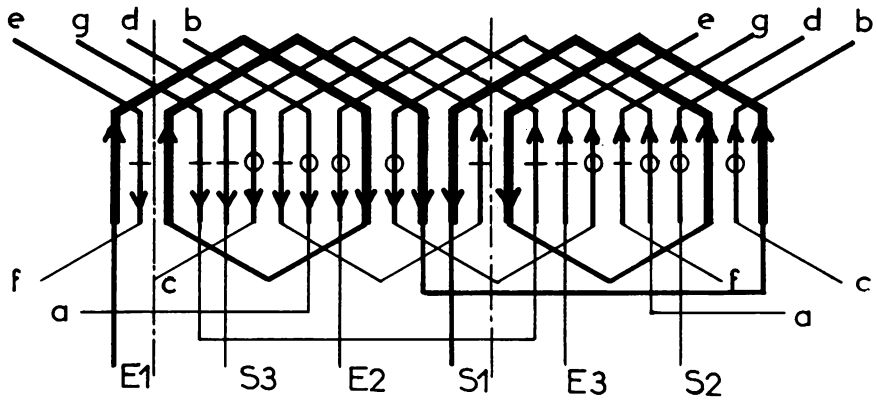


Fig. 53.

pas 1-8 au lieu de 1-10. On remarque alors que les zones dans lesquelles les courants des encoches voisines sont de même sens, sont inférieures à la largeur d'un pas polaire π/p.

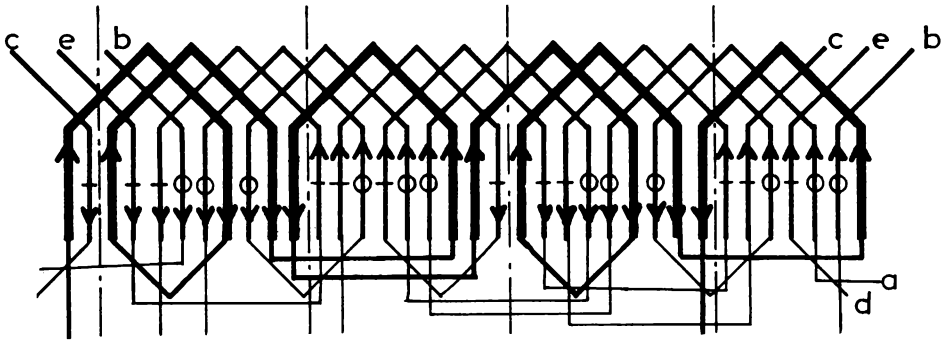


Fig. 54.

Le tracé d'un bobinage à pas raccourci est un peu plus délicat à cause de la présence possible de deux phases différentes dans une même encoche. Pour éviter les erreurs, il est bon d'appliquer la méthode suivante *(fig.* 55*)* :

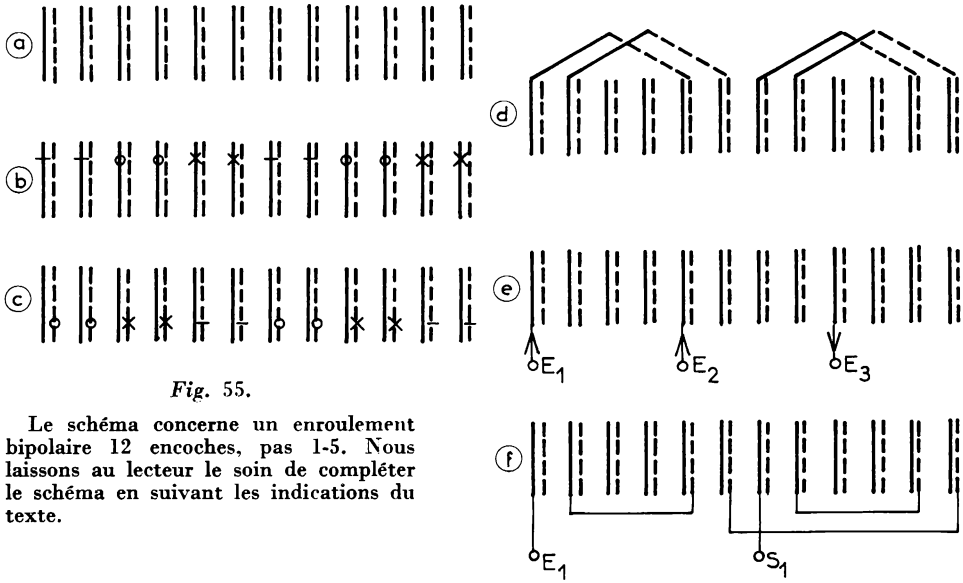


Fig. 55.

Le schéma concerne un enroulement bipolaire 12 encoches, pas 1-5. Nous laissons au lecteur le soin de compléter le schéma en suivant les indications du texte.

— tracé des faisceaux aller et des faisceaux retour pour toutes les encoches. Les faisceaux près de l'entrefer sont représentés en trait plein et les faisceaux en fond d'encoche en trait pointillé ;

— répartition des *faisceaux aller* (en trait plein) *entre les* 3 *phases à raison de* z/6p *faisceaux consécutifs pour un bobinage par pôle* et de z/3 p *faisceaux consécutifs pour un bobinage à pôles conséquents* ;

— répartition des faisceaux retour (en traits pointillés) entre les 3 phases, dans les mêmes conditions que les faisceaux aller, mais en observant, par rapport à ces derniers, *un décalage égal au pas* ;

— liaison des faisceaux aller et des faisceaux retour décalés entre eux d'un pas ;

— mise en place des entrées ;

— mise en place des connexions sur une phase ;

— tracé du schéma développé ;

— mise en place des flèches représentant les sens de courant, en se rappelant que deux phases doivent fournir un courant de même sens, tandis que la troisième fournit un courant de sens inverse.

Les *figures* 56 *et* 57 concernent des schémas à pas raccourcis pour des stators à 2 et 4 pôles à demi-bobines.

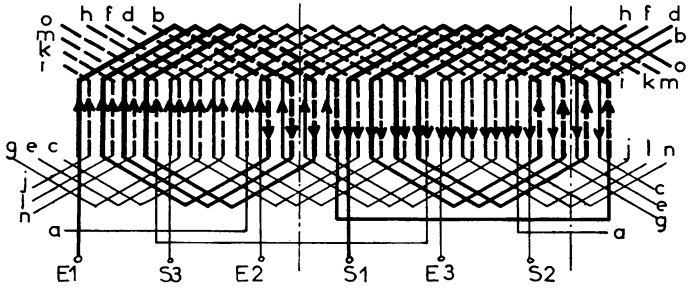


Fig. 56.
Enroulement bipolaire.
Pas raccourci 1-9.

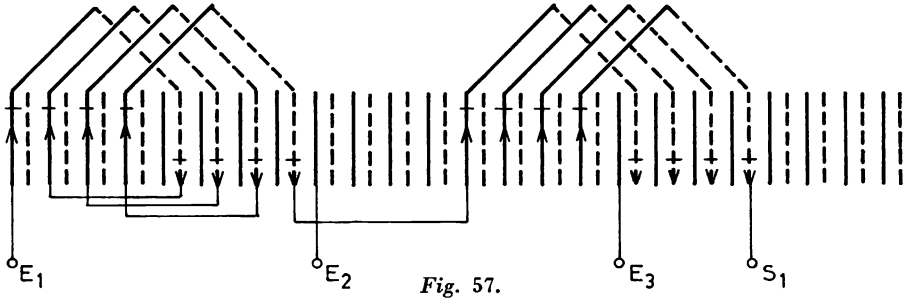


Fig. 57.
Enroulement tétrapolaire à pôles conséquents. Pas raccourci 1-5. Nous engageons le lecteur à terminer le schéma.

3.133. Enroulements à fils à phase étalée.

On les rencontre quelquefois sur des petites machines. Leur justification est assez difficile à établir ; les constructeurs qui les ont adoptés leur accordent une amélioration du fonctionnement, soit en marche normale, soit au démarrage. La *figure* 58 en donne l'application à un stator 36 encoches, dans lequel chaque phase occupe 4 encoches sous chaque pôle au lieu de 3. On peut également remarquer que les bobinages à pas raccourci enchevêtrés par demi-bobines conduisent aussi à un étalement de chaque phase.

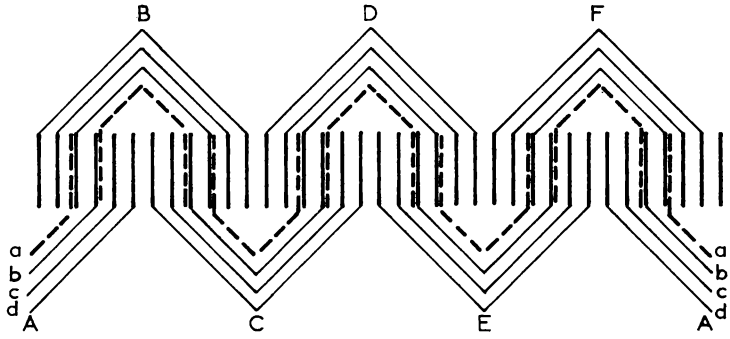


Fig. 58.

La phase 1 est constituée par les groupes A et D, la phase 2 par B et E, la phase 3 par C et F. Les bobines en trait fort pointillé représentant les bobines ajoutées au bobinage normal.

3.134. Enroulements en barres à nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Lorsque l'intensité est importante, la section du fil augmente et il peut être avantageux d'utiliser alors des barres de section méplate. Cette disposition est surtout intéressante sur les rotors où la très faible fréquence des courants ne risque pas de provoquer d'effet pelliculaire, ni de pertes supplémentaires, ce qui permet d'utiliser des barres de forte section toutes montées en série.

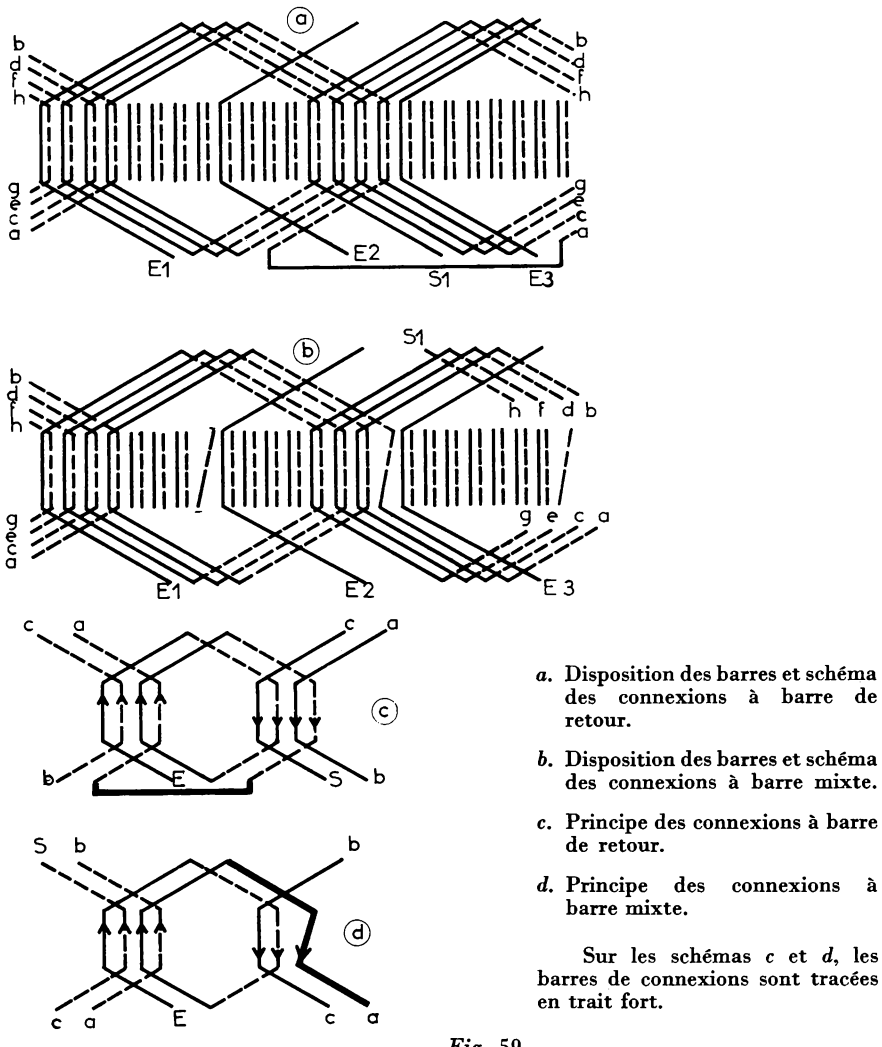
Les barres sont disposées dans les encoches en deux couches, à raison d'une, deux ou trois barres par couche. Une spire est formée par la jonction d'une barre de la couche supérieure avec une barre de la couche inférieure, décalées d'un pas polaire.

Comme en courant continu, on peut monter, en série, toutes les barres situées sous le même pôle avant de passer au pôle suivant, et obtenir un bobinage imbriqué.

On peut aussi connecter en série toutes les barres occupant des positions homologues sous tous les pôles, et obtenir un enroulement ondulé.

◆ **Enroulement imbriqué.**

Dans un bobinage à $2p$ pôles, il est possible d'obtenir $2p$ circuits, que l'on peut coupler en série, en parallèle, ou en série parallèle. Il est possible de concevoir des enroulements à pas raccourci. La *figure* 59 donne le schéma d'un enroulement bipolaire à barres.



a. Disposition des barres et schéma des connexions à barre de retour.

b. Disposition des barres et schéma des connexions à barre mixte.

c. Principe des connexions à barre de retour.

d. Principe des connexions à barre mixte.

Sur les schémas *c* et *d*, les barres de connexions sont tracées en trait fort.

Fig. 59.

◆ **Enroulements ondulés.**

Dans ces enroulements la mise en série de barres homologues prises sous les pôles voisins s'effectue sans jamais revenir en arrière et il en résulte qu'on parcourt l'entrefer total après avoir connecté p barres de la couche supérieure et p barres de la couche inférieure. Au bout d'un certain nombre de tours, on a ainsi constitué *un circuit par phase avec seulement la moitié des barres.* On a, par exemple, utilisé toutes les barres supérieures sous les premier, troisième, cinquième pôle, et les barres inférieures sous les deuxième, quatrième, sixième, ... pôles. Les barres inférieures des pôles impairs et les barres supérieures des pôles pairs, encore disponibles, constituent un second circuit.

Les connexions entre ces deux voies d'enroulements peuvent s'effectuer, soit par une barre spéciale dite *barre de retour située entièrement du côté des têtes de bobines, à l'extérieur du fer*, soit par une barre *située dans une encoche*, et passant de *l'étage inférieur à l'étage supérieur* et, pour cette raison, appelée *barre mixte.* L'adoption de la barre mixte entraîne la suppression d'une demi-spire par phase et reporte les sorties de phase sur le côté opposé aux entrées.

Le pas raccourci ne présente aucun avantage, car si une barre est raccourcie, l'autre doit être allongée ; le pas est donc toujours diamétral. La *figure* 60 représente un enroulement tétrapolaire ondulé avec connexion par barre de retour et par barre mixte et la *figure* 60 *bis* un enroulement à 6 pôles.

3.135. Enroulements en barres à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase.

La modification de la polarité d'une machine, ou le désir d'atténuer les harmoniques, peuvent conduire à adopter des nombres non entiers d'encoches par pôle et par phase.

L'enroulement imbriqué peut être réalisé pour tous les nombres d'encoches multiples de 3, mais le nombre de barres sous chaque pôle peut ne pas être le même pour chaque phase. Des considérations relatives à la symétrie imposent, pour les nombres de pôles multiples de 3, un nombre d'encoches multiple de 9, et, pour les nombres de pôles multiples de 3^n, des nombres d'encoches multiples de 3×3^n.

L'enroulement ondulé n'est concevable que si le nombre de barres par pôle et par phase est entier. Pour obtenir des f.é.m. identiques sur chaque phase et déphasées entre elles de 120°, il est nécessaire que l'espace séparant les entrées de deux phases, *nécessairement multiple du nombre d'encoches par pôle et par phase*, détermine un angle géométrique correspondant à un déphasage de $2\pi/3$, d'où les conditions suivantes :

si $2p$ est multiple de 3^n, z doit être multiple de 3^{n+1}.

Exemple : $2p = 12$; 12 est multiple de 3^1 ;

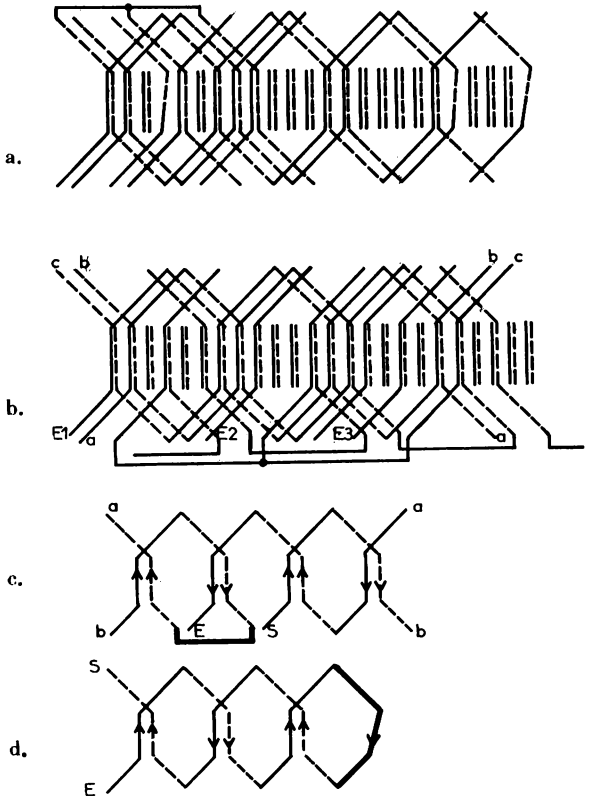


Fig. 60.

a. Disposition des barres et schéma des connexions à barre de retour.
b. Schéma des connexions à barre mixte.
c. Principe des connexions à barre de retour.
d. Principe des connexions à barre mixte.

Le lecteur complètera les schémas *a* et *b*.

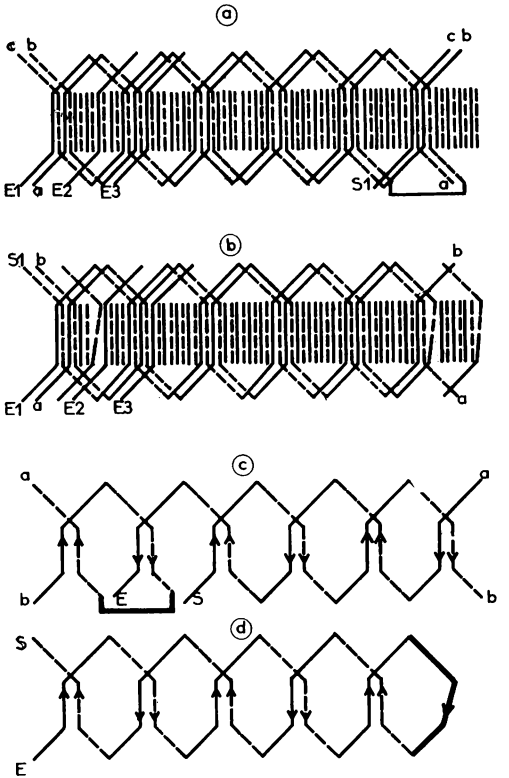


Fig. 60 *bis.*

a. Disposition des barres et schéma des connexions à barre de retour.
b. Connexions à barre mixte.
c. Principe des connexions à barre de retour.
d. Principe des connexions à barre mixte.

Le lecteur complètera les schémas *a* et *b*.

z doit être multiple de 3^{1+1}, soit multiple de 9 ; les solutions possibles pour z sont : 27, 36, 45, 54, 63, ...

Prenons 63 encoches avec 4 barres par encoche :

Nombre de barres par pôle et par phase :

$$\frac{63 \times 4}{3 \times 12} = 7$$

Décalage des entrées de phase :

$$\frac{63}{3 \times 6} = 3{,}5$$

On choisit alors un décalage double qui correspond à des déphasages électriques de 240° et les entrées seront situées dans les encoches 1, 8, 15.

Il est encore possible, dans des cas désespérés, de réaliser des enroulements dissymétriques en nombre de barres et en déphasage, mais le lecteur ne s'offusquera pas si nous lui affirmons qu'il faut être très prudent et posséder déjà une expérience pratique que l'on ne peut guère acquérir qu'à l'atelier de bobinage.

3.136. Enroulements pour moteurs à deux vitesses.

Une première solution consiste à prévoir deux enroulements complètement indépendants, dans les mêmes encoches. Il est alors possible d'obtenir deux vitesses quelconques et c'est le seul procédé utilisable lorsque le rapport des vitesses est différent de 2.

Une autre solution consiste à n'utiliser qu'un seul bobinage dont on modifie les connexions. Ces enroulements sont dits commutables et permettent d'obtenir des rapports de vitesse égaux à 2 seulement. C'est ce type que nous allons étudier.

PRINCIPE — *Considérons un enroulement réduit à deux bobines (fig. 61).* Pour des pas et des écartements convenables entre les deux bobines, le couplage série entraîne la formation de quatre pôles conséquents.

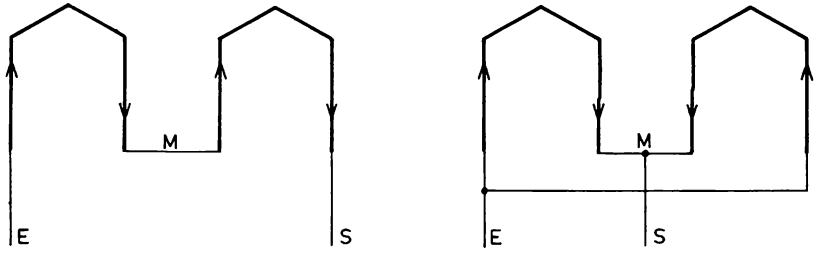


Fig. 61.

Refermons maintenant l'entrée et la sortie et alimentons le bobinage entre le point milieu M et le point de jonction ES. Nous obtenons un enroulement dans lequel les sens de courant, imposés par ce couplage, déterminent deux pôles.

La grande polarité correspondant à la petite vitesse s'obtient par un couplage série et un bobinage à pôles conséquents.

La plus petite polarité, correspondant à la grande vitesse, s'obtient par un couplage parallèle et un bobinage par pôles.

Le point milieu du couplage série sert d'entrée au couplage parallèle, et la sortie du couplage parallèle s'obtient en reliant les entrées et sortie du bobinage série.

Le principe est applicable à tous les enroulements, quels que soient les polarités et le nombre de phases, mais il faut prendre la précaution de réaliser les connexions série de façon qu'elles assurent effectivement la formation du nombre de pôles convenable en couplage parallèle. Ce résultat est obtenu en *connectant d'abord en série toutes les bobines d'ordre impair, puis toutes les bobines d'ordre pair*; le point milieu étant pris à la jonction des bobines paires et des bobines impaires (*fig.* 62).

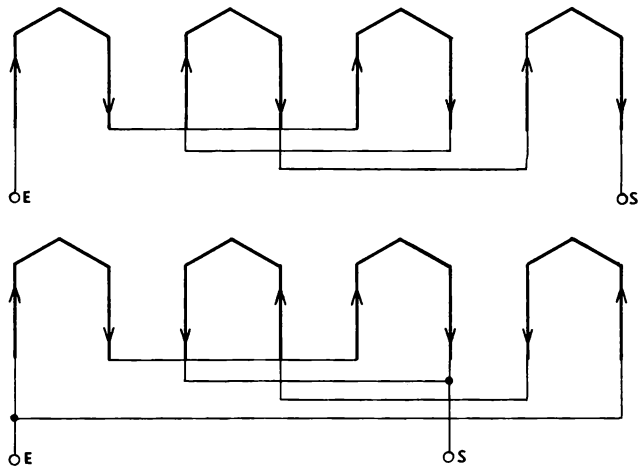


Fig. 62.

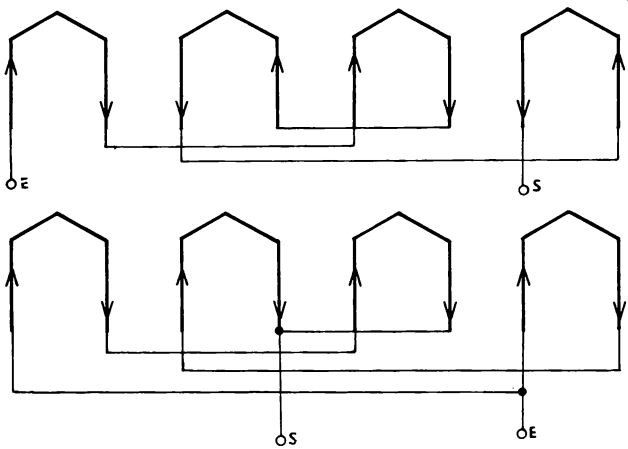


Fig. 63.

Il est théoriquement possible d'obtenir des enroulements commutables en couplant en série les bobines pour la grande vitesse et en parallèle pour la petite vitesse. Le principe des connexions est indiqué sur la *figure* 63.

3.137. Application aux enroulements triphasés.

Pour les machines triphasées, l'ensemble des solutions est indiqué dans le *tableau* III. Seules les deux premières solutions présentent un intérêt réel, et le plus souvent on utilise le couplage triangle série pour la petite vitesse et le couplage étoile parallèle pour la grande vitesse.

Les moteurs modernes sont tous réalisés avec des enroulements à demi-bobines. Le pas choisi est raccourci pour la grande vitesse. Le raccourcissement adopté influe sur la valeur de l'induction dans l'entrefer et dans les tôles, et par suite sur le degré de saturation du circuit magnétique et sur la valeur du courant absorbé à vide. Il est assez souvent pris égal à 1/3.

Le couplage sur la borne est conforme aux schémas de la *figure* 64. Ces dispositions permettent d'obtenir le même sens de rotation pour les deux vitesses, lorsqu'on alimente par la même phase les bornes placées en vis-à-vis.

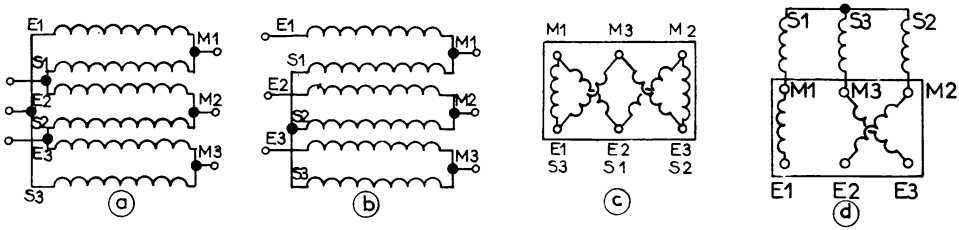
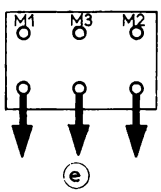


Fig. 64.

a. Schéma développé couplage D série.
b. Schéma développé couplage Y parallèle.
c. Liaisons des bobines aux bornes avec couplages D-YY.
d. Liaisons des bobines aux bornes avec couplages Y-YY.
e. Alimentation série (P.V.).
f. Alimentation parallèle (G.V.).



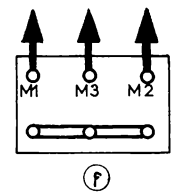


TABLEAU III

Vitesse	Couplage	Variation du couple	Variation de la puissance
PV GV	D YY	Légère diminution du couple à la grande vitesse. En pratique : $C_{GV} = 0{,}75\ C_{PV}$	*Varie dans le même sens que la vitesse.* (*En pratique* $P_{max} = 1{,}5\ P_{mini}$
PV GV	Y YY	Augmente avec la vitesse : $C_{GV} = 1{,}5\ C_{PV}$	*Puissance fortement croissante avec la vitesse :* $P_{GV} = 3\ P_{PV}$
PV GV	YY D	Inversement proportionnel à la vitesse.	*Puissance à peu près constante.*

Les autres solutions, théoriquement envisageables du point de vue schéma, sont sans intérêt pratique.

La *figure* 65 donne le schéma d'un moteur 2-4 pôles, 24 encoches. Les éléments du schéma se déterminent de la façon suivante : le nombre de demi-bobines est égal à 24 (48 faisceaux à raison de 2 par encoche), ce qui entraîne

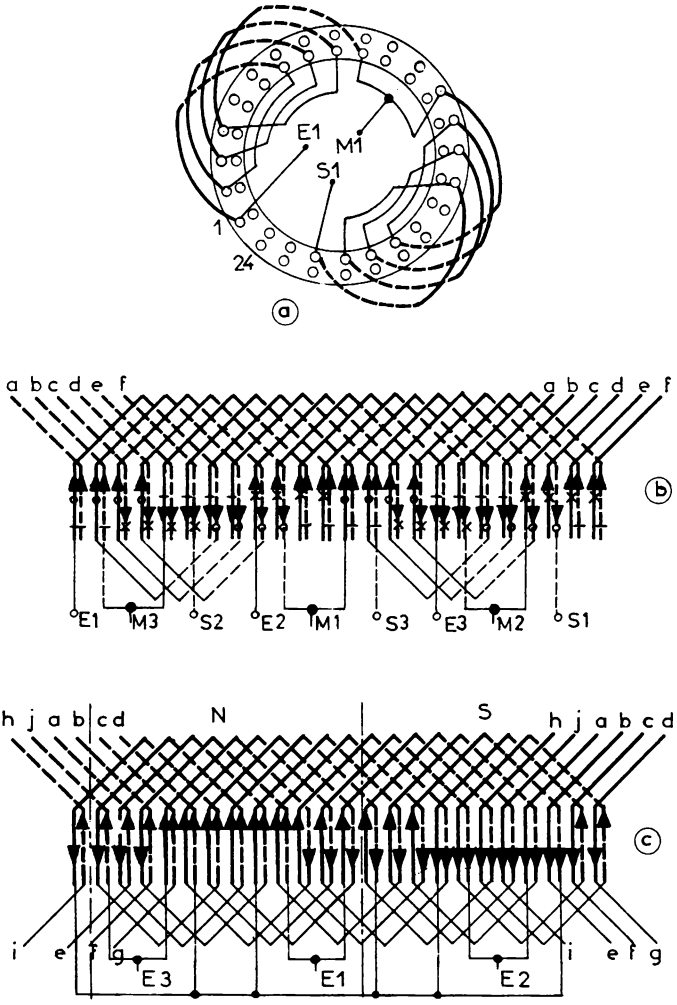


Fig. 65.

a. Projection frontale d'une phase.
b. Répartition des sens de courant en 4 pôles.
c. Répartition des sens de courant en 2 pôles.

l'utilisation de 8 demi-bobines par phase, soit encore 2 groupes de 4 demi-bobines consécutives (bobinage à pôles conséquents pour 4 pôles). Le schéma est tracé avec un pas 1-7 qui correspond à une valeur très adoptée en pratique. Il ne présente aucune difficulté particulière ; il suffit de procéder à la répartition des différents faisceaux comme il a été indiqué à propos des enroulements à pas raccourcis à demi-bobines et de respecter les règles qui viennent d'être énoncées en ce qui concerne les connexions.

La seule difficulté réside dans la détermination des entrées de phases. En effet, les mêmes décalages géométriques subsistent dans les deux couplages et ils doivent correspondre à des déphasages électriques convenables. Le résultat est atteint très facilement en adoptant 120° électriques pour la petite polarité (grande vitesse), ce qui correspond nécessairement à 240° électriques pour la grande polarité (petite vitesse). Dans l'exemple choisi, les entrées seront à 120° géométriques.

3.138. Moteurs à rotor bobiné à deux vitesses.

Les considérations précédentes s'appliquent essentiellement aux moteurs à cage. La réalisation de moteurs à rotor bobiné à deux vitesses est possible à condition de prévoir également un bobinage rotorique à deux polarités. Il est évidemment nécessaire de prévoir des blocs de bagues à 6 bagues ou des démarreurs centrifuges permettant le démarrage sur les deux vitesses.

3.139. Moteurs à 3 ou 4 vitesses.

Ils se réalisent avec deux bobinages séparés, l'un des bobinages ou les deux étant commutables. Ils ne sont concevables qu'avec des rotors à cage, à cause de la complication qui résulterait de l'aménagement du rotor bobiné.

3.140. Moteurs à rotors concentriques.

L'organisation de ces machines est la suivante *(fig. 66)* :

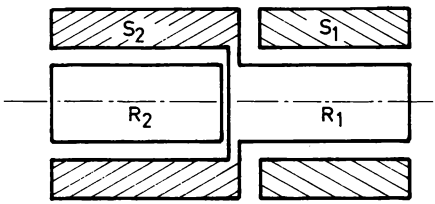


Fig. 66.

S_1. Stator fixe.
R_1. Rotor de S_1.
S_2. Inducteur tournant solidaire de R_1.
R_2. Rotor de S_2.

— un *stator à une ou deux polarités* commutables agit sur un rotor ;
— ce *rotor comporte une cage et un enroulement* disposé dans un circuit magnétique solidaire mécaniquement de la cage, mais disposé de façon à ne pas être traversé par le flux du premier stator ; ce bobinage est alimenté par l'intermédiaire de bagues en parallèle avec le stator extérieur ;

— un *deuxième rotor* est soumis à l'action de ce bobinage tournant et constitue, en fait, le rotor d'utilisation.

Il est ainsi possible d'obtenir deux ou trois vitesses sur le rotor d'utilisation ; ces vitesses sont égales à la somme des vitesses du bobinage tournant par rapport au premier stator et du rotor subissant l'effet du bobinage tournant.

Les schémas de bobinage ne présentent aucune disposition spéciale.

3.2. — ENROULEMENTS D'INDUITS A COLLECTEUR

En raison des difficultés qu'il y aurait de représenter un nombre important de lames, et de la complexité de lecture, les exemples traités concernent des enroulements à faible nombre d'encoches et faible nombre de lames. Sauf indications contraires, on considérera toujours un nombre d'encoches égal au nombre de lames, autrement dit chaque encoche ne contiendra qu'une section.

3.21. — ENROULEMENTS IMBRIQUÉS

3.211. Enroulement bipolaire diamétral.

Nous avons déjà fait remarquer que, pour obtenir un pas diamétral, le nombre d'encoches devait être un multiple du nombre de pôles. La *figure* 67 en donne l'application à un induit comportant 16 lames au collecteur et 16 encoches.

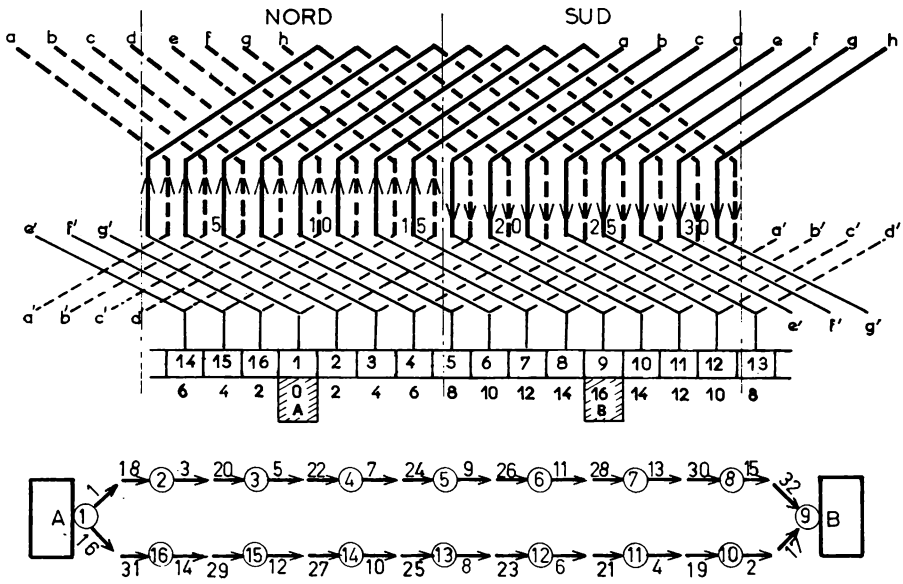


Fig. 67.

Les différents pas ont pour valeur :

— pas sur le fer : $y_f = 1\text{-}9$;

— pas arrière : $y_1 = 17$;

— pas avant : $y_2 = 15$.

y_1 étant supérieur à y_2, le bobinage est donc du type progressif.

L'enroulement a été tracé en supposant les lignes neutres entre deux encoches. Tous les conducteurs soumis à l'influence d'un pôle sont parcourus par un courant de même sens, tandis que les conducteurs placés sous l'autre pôle sont parcourus au même instant par un courant de sens inverse.

Le potentiel au collecteur et le schéma développé montrent que le bobinage est parfaitement équilibré, chacune des voies d'enroulement comptant le même nombre de conducteurs.

Les balais sont placés sur les lames présentant entre elles la plus grande différence de potentiel. On remarquera que la position des balais, par rapport aux pôles inducteurs, est déterminée par la forme des sections. Les *figures* 68 indiquent approximativement la position des balais en fonction de la forme des sections.

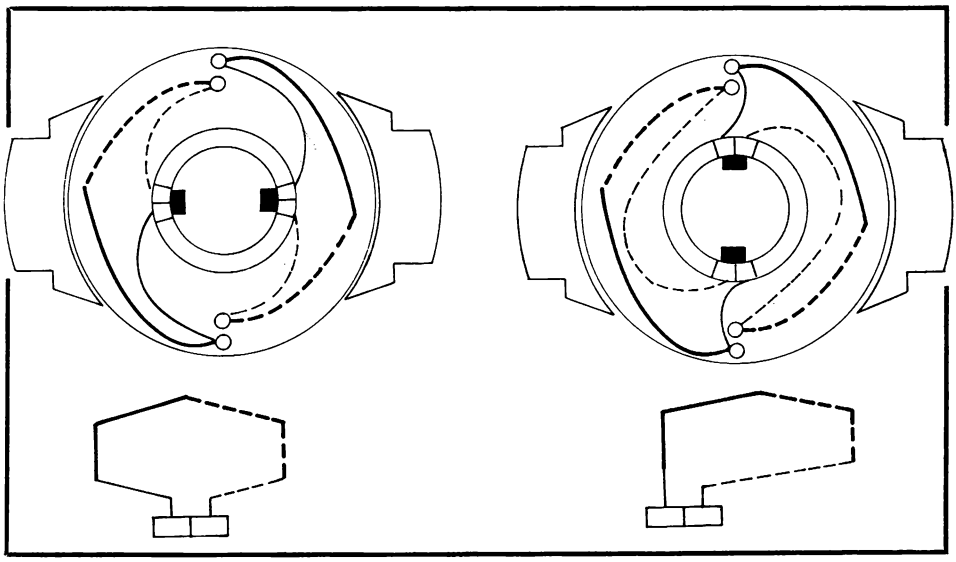


Fig. 68.

3.212. Enroulement bipolaire à pas raccourci.

Un exemple est traité sur la *figure* 69. Avec 13 lames au collecteur, le pas diamétral rigoureux n'est plus possible. L'adoption d'un pas légèrement raccourci (1-6 sur le fer) entraîne comme conséquence la formation de courants induits en opposition dans les sections dont un des faisceaux se trouve sur la ligne neutre.

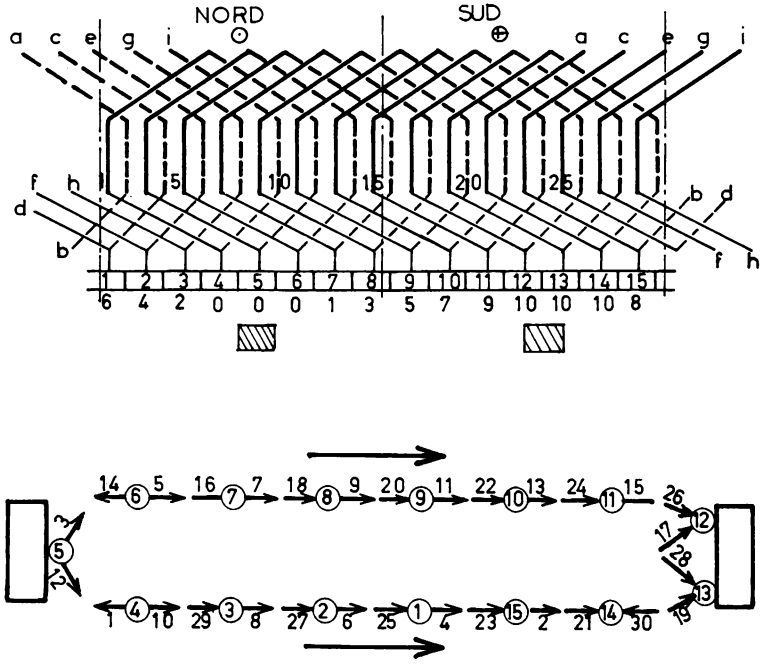


Fig. 69.

Le lecteur vérifiera les potentiels au collecteur après avoir déterminé les sens de courant.

3.213. Enroulements bipolaires doubles.

Les *figures* 70 et 71 concernent respectivement :

— un enroulement à circuit unique ayant pour caractéristiques :

$k = 17$; $2p = 2$; $2a = 4$; $y_c = 2$; $y_1 = \dfrac{34}{2} = 17$, donc, presque diamétral ; $y_2 = 17 - 4 = 13$;

— un enroulement à deux circuits indépendants, pour lequel on a choisi : $k = 16$; $2p = 2$; $2a = 4$; $y_c = 2$; $y_1 = \frac{32 + 2}{2} = 17$, donc, diamétral rigoureux ; $y_2 = 13$.

Dans les deux cas. il s'agit d'enroulements progressifs.

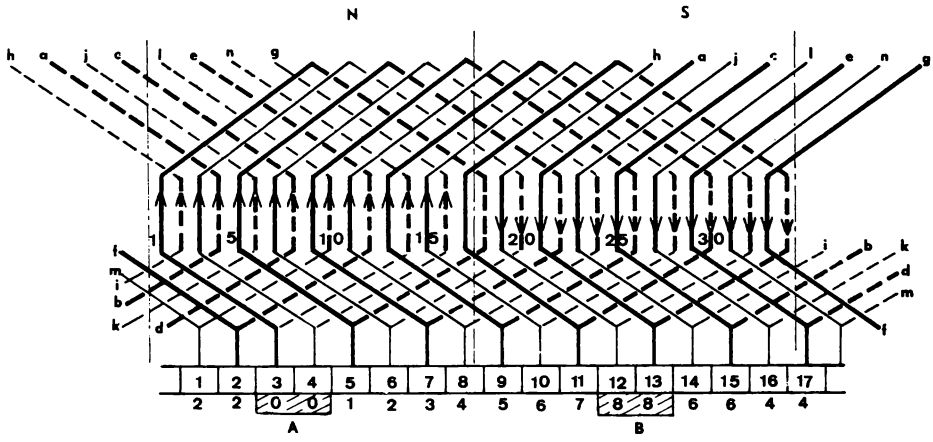


Fig. 70 *a.* — Bobinage double à un seul circuit :
$k = 17$, $y_1 = 17$. $y_2 = 13$. $y = 4$, $y_c = 2$.

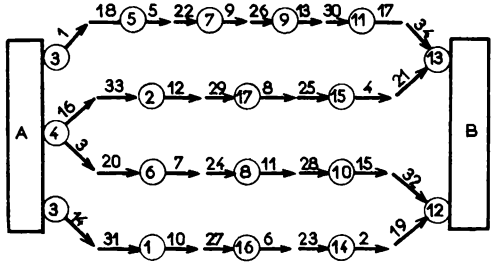
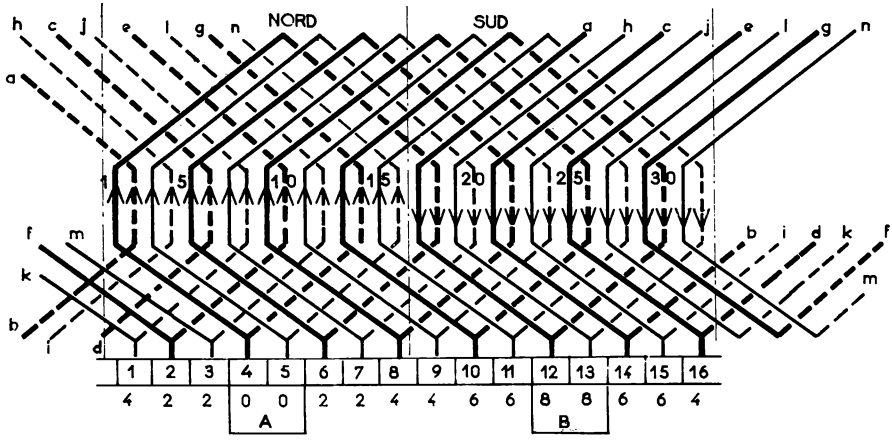


Fig. 70 *b.*
Bobinage imbriqué double à un seul circuit:
$k = 17$, $y_1 = 17$ $y_2 = 13$.

3.214. Enroulements multipolaires.

La *figure* 72 concerne un enroulement tétrapolaire simple dans lequel :
$k = 20$; F $= 40$; $2p = 4$; $2a = 4$



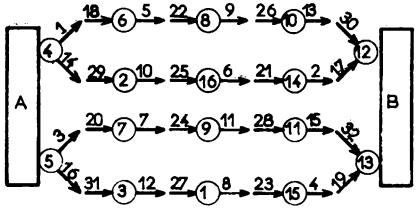
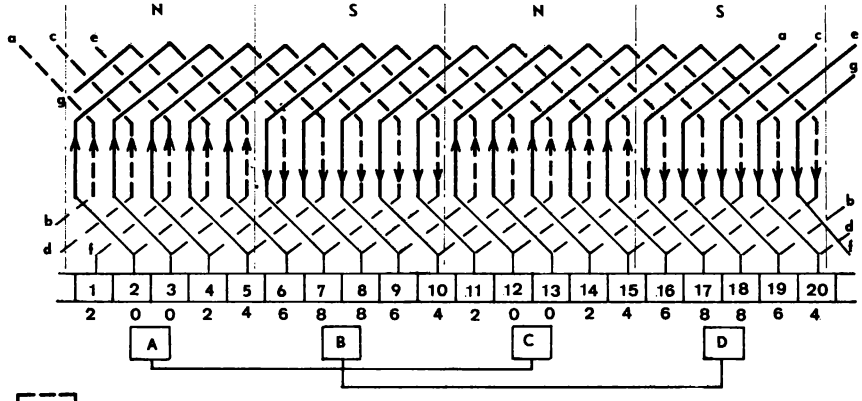


Fig. 71.

Bobinage imbriqué double à deux circuits indépendants :
$k = 16$, $2p = 2$, $2a = 4$,
$y_1 = 17$, $y_2 = 13$.



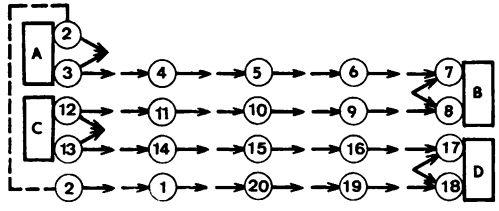


Fig. 72.

Enroulement imbriqué tétrapolaire simple :
$k = 20$, $y_1 = 9$, $y_2 = 7$,
$2a = 4$, $2p = 4$.

Le pas diamétral est possible, il aurait pour valeur 1-6 sur le fer, ce qui correspondrait à un pas $y_1 = 11$. Le pas choisi a été légèrement raccourci et pris égal à 9. Le pas y_2 est égal à 7 ce qui correspond à un enroulement progressif.

La courbe des potentiels au collecteur montre que toutes les lames diamétralement opposées sont toujours au même potentiel. Elles peuvent donc être réunies par des connexions équipotentielles.

Signalons que dans la pratique, on n'utilisera jamais un bobinage imbriqué avec aussi peu de sections. Il ne faut voir là qu'un simple exemple d'initiation.

Nous laissons au lecteur le soin d'imaginer d'autres exemples de bobinages multipolaires simples ou multiples.

3.22. — ENROULEMENTS ONDULES

3.221. Enroulement série simple.

Nous avons déjà fait observer que, par principe même, ces enroulements étaient nécessairement multipolaires.

La *figure* 73 traite un exemple relatif à un enroulement tétrapolaire pour lequel :

$$k = 17\,;\ F = 34\,;\ 2a = 2\,;\ 2p = 4$$

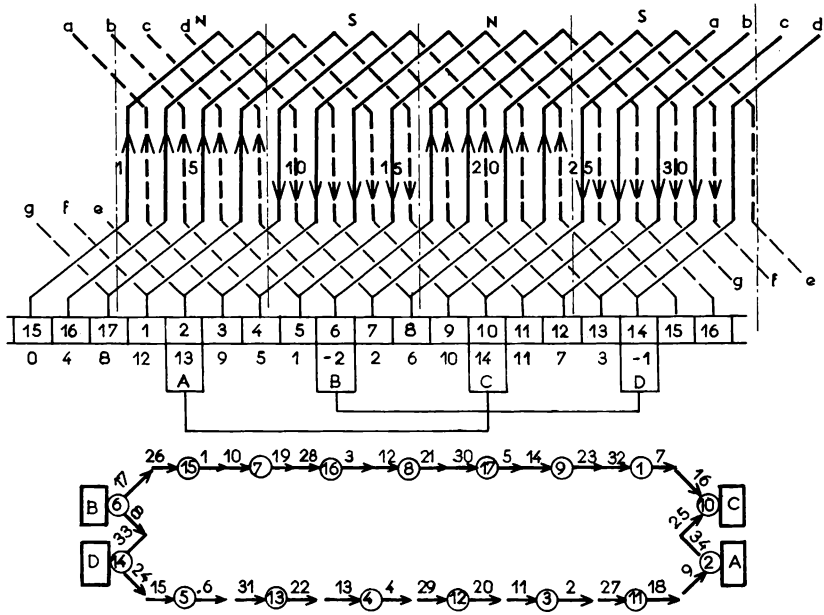


Fig. 73. — Enroulement série :
$k = 17$, $y_c = 9$, $2p = 4$, $2a = 2$, $y_1 = 9$, $y_2 = 9$.

L'application de la formule donnant le pas y_c conduit à :

$$y_c = \frac{17 + 1}{2} = 9 ;$$

$y = 18 ;$ $\qquad y_1 = y_2 = 9.$

Le schéma développé montre clairement l'organisation des deux voies d'enroulement. On remarquera qu'entre les balais B et D on trouve une seule section qui est d'ailleurs mise en court circuit par la mise en parallèle extérieure de ces deux balais. On observe la même disposition entre les deux balais A et C. Il est donc possible, dans un enroulement série, de ne monter que deux balais distants sur le collecteur d'un angle géométrique égal au pas polaire π/p. Cette disposition est adoptée pour les machines dont le collecteur et la couronne porte balais sont d'un accès difficile.

Si nous examinons la formule donnant la force électro-motrice d'une génératrice :

$$E = \frac{p}{a} nN\Phi$$

nous voyons que la f.é.m. est porportionnelle au rapport p/a. Il semblerait donc que l'enroulement série, qui donne la valeur maximale de ce rapport (puisque a est toujours égal à 1), permette la réalisation de dynamos à tension élevée. Il faut cependant remarquer qu'entre deux lames consécutives, on dispose de la tension induite dans les sections séparant ces deux lames, soit p fois la tension induite dans une section, soit encore p fois la tension qui apparaîtrait entre deux lames voisines d'une machine imbriquée pour laquelle p, n, N et Φ seraient identiques. En raison des dangers d'amorçage, on ne peut dépasser une tension entre lames de l'ordre de 25 V et il s'ensuit que la machine série ne permet pas d'obtenir une tension plus élevée que les autres types de machines.

Pour obtenir une tension élevée, il faut donc augmenter le nombre de lames au collecteur entre deux lignes de balais consécutives et on est conduit à adopter des machines bipolaires qui permettent de disposer du maximum de lames entre les balais. Il faut aussi remarquer que l'abandon des génératrices à courant continu au profit des redresseurs enlève beaucoup d'intérêt à ces remarques.

3.222. Enroulement série parallèle.

◆ Enroulement à un seul circuit. La *figure* 73 et le *tableau* IV concernent un induit tétrapolaire de 24 lames, à 4 voies d'enroulement pour lequel on obtient :

$$y_c = \frac{24 \pm 2}{2} = 13 \quad \text{ou} \quad 11$$

Le schéma a été traité avec la première solution, ce qui entraîne :

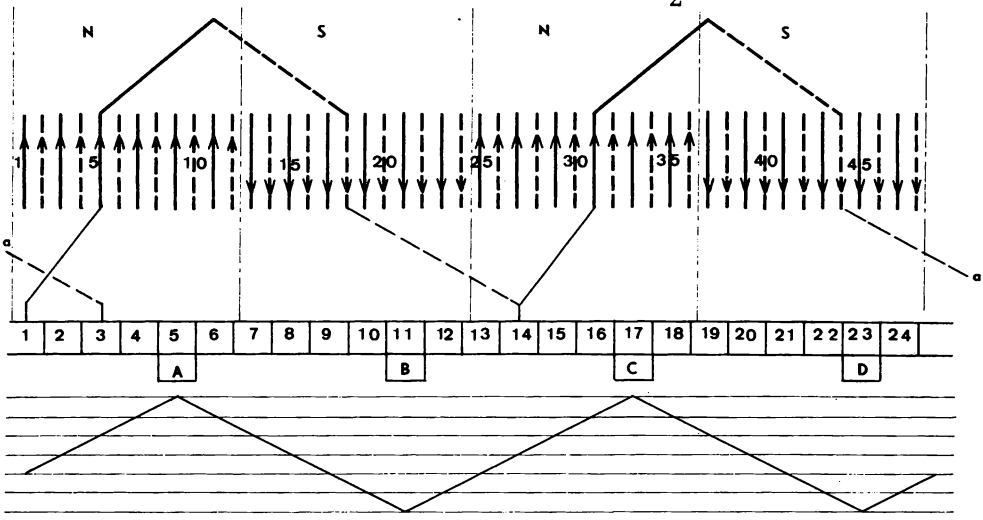
$$y = 26 ; \quad y_1 = y_2 = 13.$$

On remarque la parfaite symétrie de cet enroulement, due au fait que le pas est diamétral et que le nombre de faisceaux est identique sous chaque pôle (1).

◆ **Enroulement à circuits indépendants.**

Nous supposerons un induit tétrapolaire muni de 22 encoches avec une section par encoche et pour lequel nous désirons obtenir 4 voies d'enroulement. Il en résulte :

$$k = 22 ; \quad 2p = 4 ; \quad 2a = 4 ; \quad y_c = \frac{22 \pm 2}{2} = 12 \text{ ou } 10$$



Potentiel au collecteur.

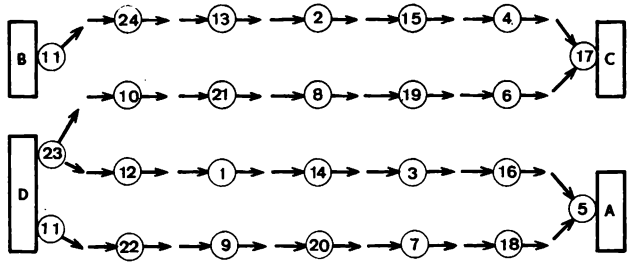


Fig. 73. — Enroulement série parallèle à un seul circuit :
$k = 24, \quad 2a = 4, \quad 2p = 4, \quad y_1 = 13, \quad y_2 = 13, \quad y_c = 13.$

(1) Nous invitons le lecteur à refaire le schema avec $y_1 = y_2 = 11$ et à comparer les résultats.

TABLEAU IV (*fig.* 73).

Enroulement série parallèle à un seul circuit.

$k = 24, \quad 2a = 4, \quad 2p = 4, \quad y_c = 13, \quad y_1 = y_2 = 13.$

Lame de départ	Faisceau de départ	Sens du courant	Faisceau de retour	Sens du courant	Lame de retour	Potentiel de la lame de retour (1)
1	5	+	18	+	14	2
14	31	+	44	+	3	4
3	9	+	22	+	16	6
16	35	+	48	+	5	8
5	13	—	26	—	18	6
18	39	—	4	—	7	4
7	17	—	30	—	20	2
20	43	—	8	—	9	0
9	21	—	34	—	22	— 2
22	47	—	12	—	11	— 4
11	25	+	38	+	24	— 2
24	3	+	16	+	13	0
13	29	+	42	+	2	2
2	7	+	20	+	15	4
15	33	+	46	+	4	6
4	11	+	24	+	17	8
17	37	—	2	—	6	6
6	15	—	28	—	19	4
19	41	—	6	—	8	2
8	19	—	32	—	21	0
21	45	—	10	—	10	— 2
10	23	—	36	—	23	— 4
23	1	+	14	+	12	— 2
12	27	+	40	+	1	0

(1) Le potentiel de la lame 1 est pris égal à 0.

La première valeur du pas y_c conduit à prendre $y = 24$. La solution correspondant à $y_1 = 13$ et $y_2 = 11$ est traitée dans les schémas des *figures* 74 et le *tableau* V.

La deuxième valeur du pas au collecteur $y_c = 10$ conduit à $y = 20$. Cette solution a été également traitée avec $y_1 = 11$ et $y_2 = 9$ dans les *figures* 75 et le *tableau* VI.

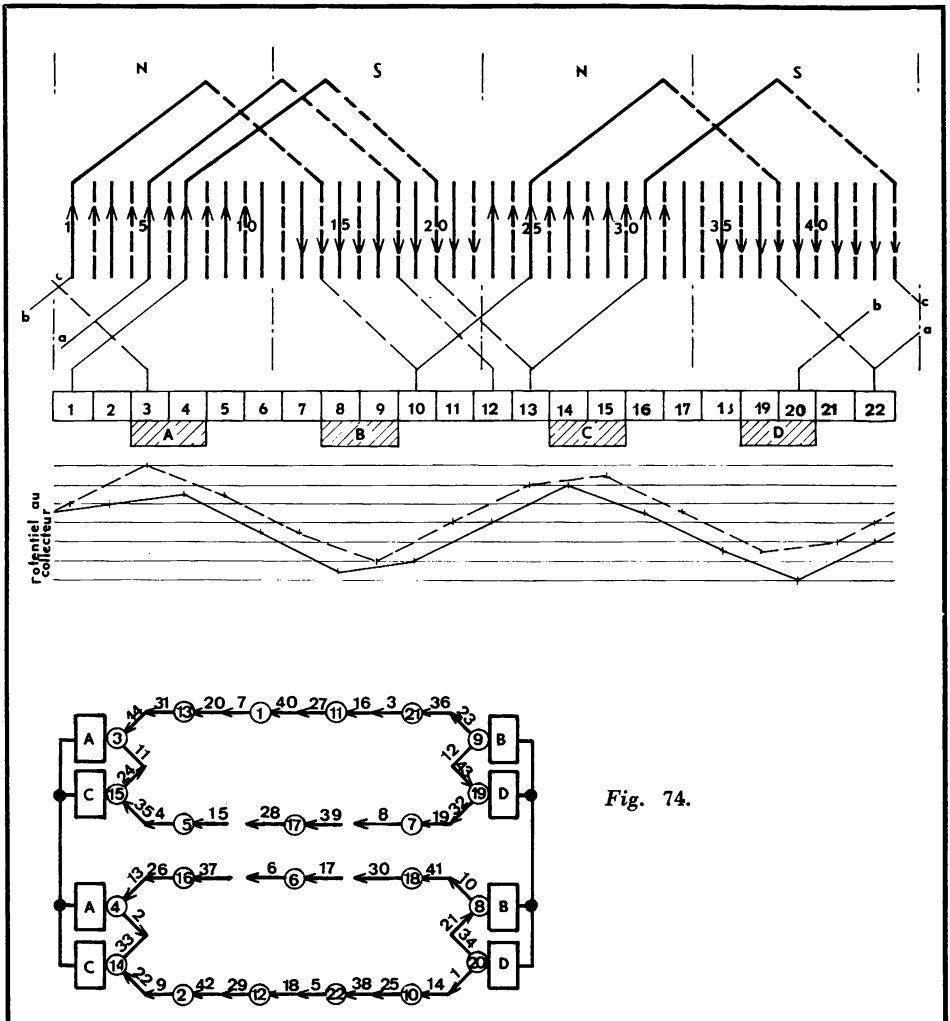


Fig. 74.

TABLEAU V (*fig.* 74).

Lame de départ	Faisceau de départ	Sens du courant	Faisceau de retour	Sens du courant	Lame de retour	Potentiel de la lame de retour (1)	
1	7	+	20	+	13	2	Premier circuit
13	31	+	44	+	3	4	
3	11	0	24	—	15	3	
15	35	—	4	—	5	1	
5	15	—	28	—	17	— 1	
17	39	—	8	—	7	— 3	
7	19	—	32	—	19	— 5	
19	43	—	12	0	9	— 6	
9	23	+	36	+	21	— 4	
21	3	+	16	+	11	— 2	
11	27	+	40	+	1	0	
2	9	+	22	+	14	2	Deuxième circuit
14	33	0	2	—	4	1	
4	13	—	26	—	16	— 1	
16	37	—	6	—	6	— 3	
6	17	—	30	—	18	— 5	
18	41	—	10	—	8	— 7	
8	21	—	34	0	20	— 8	
20	1	+	14	+	10	— 6	
10	25	+	38	+	22	— 4	
22	5	+	18	+	12	— 2	
12	29	+	42	+	2	0	

(1) Le potentiel de la lame de départ 1 est pris égal à 0.

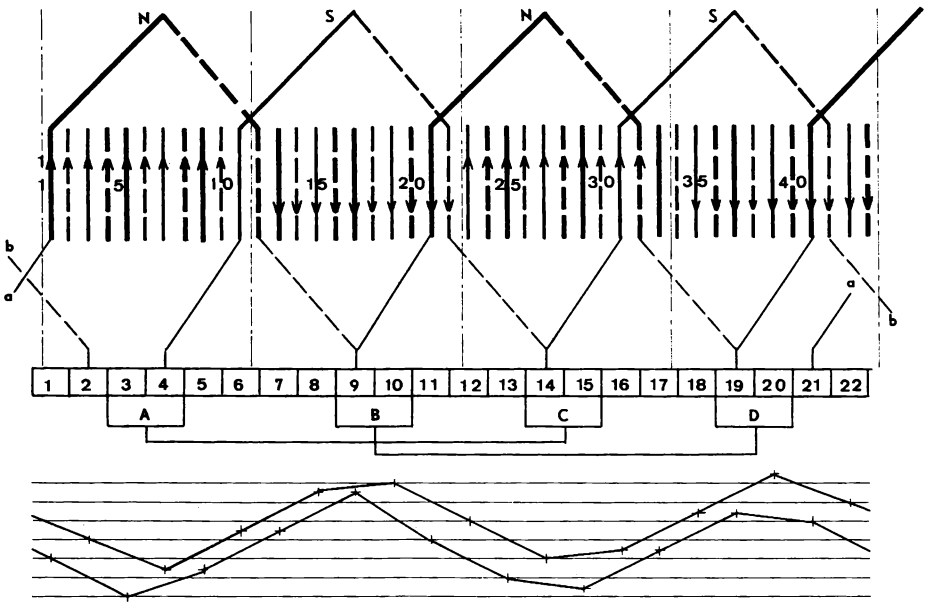
En roulement série parallèle : $k = 22$, $2a = 4$, $2p = 4$, $y_c = 12$, $y_1 = 13$, $y_2 = 11$.

TABLEAU VI (*fig.* 75).

Lame de départ	Faisceau de départ	Sens du courant	Faisceau de retour	Sens du courant	Lame de retour	Potentiel de la lame de retour (1)	
21	1	+	12	0	9	1	
9	21	—	32	—	19	— 1	
19	41	—	6	—	7	— 3	
7	17	—	28	—	17	— 5	
17	37	—	4	—	5	— 7	
5	13	—	24	—	15	— 9	
15	33	0	44	—	3	— 10	Premier circuit.
3	9	+	20	+	13	— 8	
13	29	+	40	+	1	— 6	
1	5	+	16	+	11	— 4	
11	25	+	36	+	21	— 2	
22	3	+	14	+	10	2	
10	23	+	34	0	20	3	
20	43	—	8	—	8	1	
8	19	—	30	—	18	— 1	
18	39	—	6	—	6	— 3	
6	15	—	26	—	16	— 5	
16	35	—	2	—	4	— 7	
4	11	0	22	+	14	— 6	Deuxième circuit.
14	31	+	42	+	2	— 4	
2	7	+	18	+	12	— 2	
12	27	+	38	+	22	0	

(1) Le potentiel de la lame de départ 21 est pris égal à 0.

Enroulement série parallèle : $k = 22$, $2p = 4$, $2a = 4$, $y_1 = 11$, $y_2 = 9$.



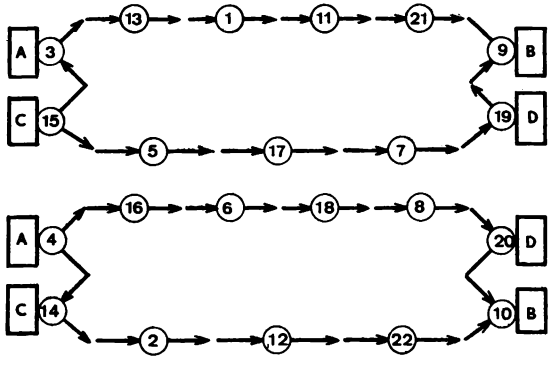


Fig. 75.
Bobinage ondulé série parallèle à circuits indépendants :
$k = 22$, $2p = 4$,
$y_1 = 11$, $y_2 = 9$.
$2a = 4$,

Le lecteur complétera le schéma développé.

3me PARTIE

LA TRACTION ÉLECTRIQUE

L'énergie électrique est utilisée pour la propulsion des véhicules de différents types :

— *locomotives destinées à la traction des trains de marchandises ou de voyageurs ;*

— *automotrices destinées aux trains légers pour voyageurs ;*

— *locomotives de manœuvres ;*

— *véhicules de transports en commun à service urbain (trolleybus) ;*

— *véhicules routiers à service urbain, à vocations diverses : livraisons, enlèvement des ordures ménagères...*

— *chariots de manutention.*

I. Traction des trains

L'étude du comportement des locomotives montre que les problèmes mécaniques ont une très grosse influence et il paraît difficile, voire impossible, de vouloir les ignorer même si cette étude se borne à des considérations très générales d'un niveau élémentaire.

1.1. — ÉTUDE MÉCANIQUE D'UNE MACHINE MOTRICE

1.11. — ÉQUATIONS D'ÉQUILIBRE

Les forces appliquées à la machine dépendent de nombreux facteurs :

- — *forces de contact* dues au frottement entre la roue et le rail ;
- — *effort de tirage* T exercé sur le crochet d'attelage ;
- — *poids P de la locomotive* ;
- — *résistance de l'air* se traduisant par une force S appliquée dans le même sens que l'effort de traction ;
- — *forces d'inertie* pendant les périodes d'accélération.

Nous étudierons l'équilibre de la machine en mouvement uniforme ; les résultats sont valables en période d'accélération en ajoutant les forces d'inertie $-m\frac{dv}{dt}$ qui s'exercent en sens inverse du vecteur accélération.

La *figure* 1 indique les différentes forces appliquées. On remarquera notamment que les actions de contact rail-roue sont inclinées d'un angle γ par rapport à la normale et que leur point d'application est éloigné de la verticale passant par l'axe des roues, d'une distance δ qui détermine le coefficient de roulement.

En supposant toutes les actions de contact rail-roue parallèles, on conclut que leur résultante doit équilibrer la résultante des autres forces appliquées (1).

(1) Voir aussi *La Mécanique par les problèmes*, par A. Campa, R. Chappert et Picand. Foucher Editeur.

On retrouve l'angle γ entre le poids de la machine et la résultante R des efforts horizontaux et du poids.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{T + S}{P}$$

Le terme T + S représente l'effort résistant du convoi et comprend :

— les *résistances au roulement* (bandage sur rail, fusées dans les boîtes d'essieux) indépendantes de la vitesse, mais variables avec les charges d'essieux, le type et le nombre d'essieux ;

— la *résistance de l'air* agissant sur la surface frontale et les aspérités des faces latérales, et, à l'arrière, par effet d'aspiration ; elle est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse. Le vent a une action plus ou moins néfaste suivant sa direction ;

— la résistance due aux courbes de la voie : la S.N.C.F. utilise la formule suivante :

$$r = 10 \times \frac{800}{\rho} \qquad (1)$$

r = effort de tirage supplémentaire en N/tonne.

ρ : rayon de la courbe en mètres.

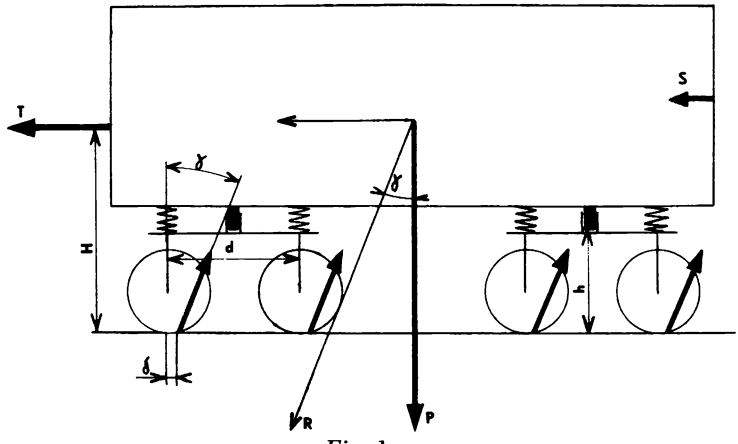


Fig. 1.

(1) En réalité, les formules utilisées par la S.N.C.F. expriment les efforts de tirage en kg/t. Cette pratique n'est plus légale depuis l'entrée en vigueur du système d'unités S.I. Dans cette édition, nous avons introduit le facteur 10 qui représente, à 2 % près, la relation entre le kgp et le Newton, ce qui nous permet d'être en conformité avec le système S.I. et de conserver presque intégralement la forme des formules de la S.N.C.F.

— la résistance à la gravité dans le cas des rampes, soit : $r = P \sin \alpha$, avec P, poids du train.

Comme les rampes sont nécessairement faibles, on peut confondre sin α et tg α, ce qui conduit à la formule suivante : en appelant i l'inclinaison en (mm/m).

$$r = \frac{Pi}{100}$$

En ce qui concerne les efforts résistants dus au roulement et à la résistance de l'air, la D.E.T.E. (Division des Etudes de Traction Electriques) utilise les formules suivantes (1) :

— pour une locomotive :

$$R = 10\,(6{,}5\,m + 13n + 0{,}01mv + 0{,}031v^2)$$

avec :

R : effort résistant en N ;
n : nombre d'essieux ;
m : masse du train en tonnes ;
v : vitesse en km/h ;

— pour le matériel remorqué :

$r = 10\,(a + bv^2)$;
r : effort de tirage en N/tonne ;
a et b : coefficients variables avec la nature du matériel remorqué.

A titre d'exemple, le coefficient a varie entre 3 (wagon vide) et 1 (wagon lourd de 80 t) tandis que b est compris entre 1/500 (wagon vide) et 1/4 000 (wagon lourd de 80 t).

1.111. Conditions de démarrage.

Pour qu'il y ait roulement sans glissement, il faut que l'angle γ soit plus petit que l'angle de frottement φ de la roue sur le rail. La condition de roulement s'écrira donc :

$$\text{tg}\,\gamma < \text{tg}\,\varphi$$

ou encore :

$$P > \frac{T + S}{\text{tg}\,\varphi}$$

(1) Les réseaux étrangers utilisent des formules assez semblables mais dont les coefficients numériques peuvent être différents.

Les conséquences de cette relation sont très importantes, elles montrent en effet que :

— pour une locomotive de poids donné, la possibilité de démarrage sera limitée par les valeurs de l'effort de tirage ou du coefficient de frottement. Autrement dit, une locomotive ne pourra pas démarrer un train trop lourd même si le coefficient de frottement est élevé ; elle ne pourra pas non plus, démarrer un train léger sur une voie dont le coefficient de frottement est faible. A plus forte raison elle ne pourra pas démarrer un train lourd sur une voie à faible frottement ;

— inversement, pour un train de poids donné et une voie dont le coefficient de frottement a une valeur donnée, la locomotive susceptible de démarrer le convoi devra avoir un poids minimal.

1.12. — ADHÉRENCE

La notion d'adhérence peut se définir comme une aptitude de la machine à exercer l'effort de traction sans patinage. Il y a effectivement adhérence tant que l'effort à la jante est inférieur à une certaine limite, ce qui peut se traduire par la relation :

$$F < Pf$$

dans laquelle f définit le coefficient d'adhérence. Il est homologue à un coefficient de frottement.

Sa valeur dépend de nombreux facteurs :

— *état de surface des rails* : l'humidité, des traces d'huile, des feuilles réduisent l'adhérence ; le sable l'augmente, ce qui explique la pratique du sablage ; le rail lavé par une pluie abondante a une meilleure adhérence que le rail simplement humide ;

— *régularité du plan de roulement* constitué par les rails ;

— *vitesse dans les courbes en dévers* ;

— *déchargement des essieux* sous l'effet du cabrage de la locomotive ;

— *oscillations* dues à la suspension de la machine ;

— *mouvements de lacets ;*

— *variations du couple moteur.*

Toutes ces causes font que le coefficient d'adhérence peut varier de 0,15 à 0,45. La valeur moyenne se situe aux environs de 0,30 et elle varie suivant le type de locomotive et avec la vitesse (*fig.* 2).

Il est intéressant de savoir que le problème de l'adhérence est de plus en plus important sur les machines modernes. En effet, sur les machines de conception ancienne, une grande puissance impliquait un poids élevé, donc un effort possible de tirage élevé même avec une adhérence moyenne. Sur les machines modernes, on arrive à installer des moteurs beaucoup plus puissants et plus légers et les possibilités de traction de la machine se trouvent limitées par l'adhérence.

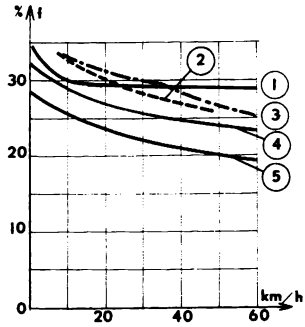


Fig. 2.

1. Locomotive BB 16500.
2. Locomotive BB 9401.
3. Locomotive BB 20103.

4-5. Courbes d'adhérence calculées d'après la formule D.E.T.E. pour locomotive monophasée (4) : $f = \frac{0{,}33\ (8 + 0{,}1\ v)}{8 + 0{,}2\ v}$ et pour une locomotive continue (5) : $f = \frac{0{,}28\ (8 + 0{,}1\ v)}{8 + 0{,}2\ v}$.

1.13. — CABRAGE

Cette expression désigne le phénomène de déchargement de certains essieux sous l'effet des efforts de traction.

Considérons une locomotive au moment du démarrage. Les projections horizontales des actions de contact du rail sur les roues forment, avec l'effort de tirage, des couples dont l'effet est de faire pivoter la locomotive dans un sens tel que l'avant a tendance à se soulever (*fig.* 3). Ce couple est compensé par un couple que les organes de suspension exercent sur la caisse.

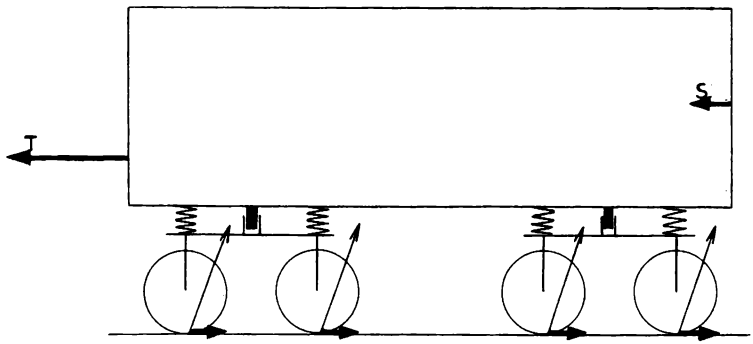


Fig. 3.

1.131. Cabrage de la caisse.

Nous supposerons, dans un but de simplification, que l'entraînement de la caisse se fait par deux pivots situés au-dessus des bogies à une distance h du rail ; le crochet est à la hauteur *H*. La caisse est en équilibre sous l'effet des forces suivantes (*fig.* 4) :

— *poids de la caisse P* appliqué en son centre de gravité ;
— *effort de tirage T* appliqué au crochet ;
— *actions de contact E et F* des bogies sur les pivots de la caisse. Ces actions de contact peuvent se décomposer chacune en une action horizontale et une action de contact verticale.

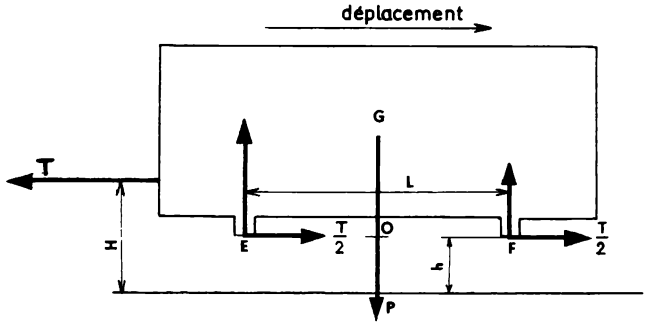


Fig 4.

La somme des projections des forces appliquées étant nulle, il s'en suit que les actions de contact horizontales E et F doivent équilibrer l'effort T ; nous supposerons chacune de ces actions égale à T/2. La somme des actions de contact verticales sur les pivots est égale au poids de la caisse.

Si nous considérons maintenant les équations des moments par rapport à O, milieu de EF, la relation suivante doit être satisfaite :

$$\overline{M}_0\overrightarrow{T} + \overline{M}_0\overrightarrow{E} + \overline{M}_0\overrightarrow{F} = 0$$

On remarquera que les moments par rapport à O des actions T/2 sont nuls.

Le moment résultant des forces E et F par rapport à O n'est pas nul. Ces forces étant situées à égale distance du point O, sont nécessairement inégales. En appliquant les conventions de signe relatives aux moments, on trouve que l'action F sur le pivot arrière doit être plus élevée que l'action E sur le pivot avant. Il s'ensuit que les actions de la caisse sur les bogies varient, lorsque l'effort de traction est appliqué, dans un sens tel que l'avant de la machine se décharge au profit de l'arrière.

Cette variation de charge ΔC peut être calculée d'après les équations de moments :

$$T(H - h) - E\frac{L}{2} + F\frac{L}{2} = O$$

Au repos, en supposant le centre de gravité sur la verticale passant par O, les actions E et F sont égales à P/2 d'où :

$$\frac{P}{2} = E - \Delta C = F + \Delta C$$

$$T(H - h) - \left(\frac{P}{2} + \Delta C\right)\frac{L}{2} + \left(\frac{P}{2} - \Delta C\right)\frac{L}{2} = O$$

$$\Delta C = \frac{T(H - h)}{L}$$

1.132. Cabrage des bogies.

Le même phénomène se retrouve sur les bogies. Supposons un bogie à deux essieux, de poids propre *p*. Il est en équilibre sous l'action des forces suivantes (*fig.* 5) :

— *action de contact horizontale* de la caisse sur le pivot, supposée égale à T/2 ;

— *action de contact verticale* de la caisse sur le pivot, supposée égale à P/2 ;

— *actions de contact des rails* sur les roues admettant des projections horizontales supposées égales chacune à T/4 et des projections verticales ;

— *poids propre du bogie* p.

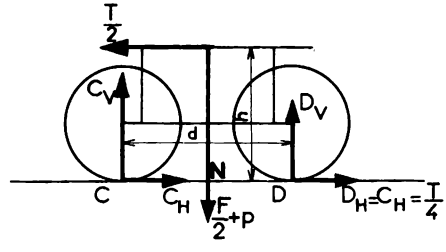


Fig. 5.

Les équations des moments par rapport à N, point situé sur le rail au milieu de CD, s'écrivent :

$$\frac{T}{2}h - \frac{C_v d}{2} + \frac{D_v d}{2} = O \qquad (1)$$

A l'état de repos, C_v et D_v sont égale chacune à :

$$\frac{F}{2} + \frac{p}{2}$$

Appelons ΔB les variations de charge sur les essieux du bogie et posons :

$$C_v = \frac{F + p}{2} + \Delta B$$

$$D_v = \frac{F + p}{2} - \Delta B$$

Remplaçons C_v et D_v dans (1) :

$$\frac{T}{2}h - \frac{d}{2}\left(\frac{F + p}{2} + \Delta B\right) + \frac{d}{2}\left(\frac{F + p}{2} - \Delta B\right) = 0$$

$$\Delta B = \frac{Th}{2d}$$

1.133. Variations de charge des essieux.

Sur un essieu quelconque, la variation totale de charge est égale à la somme des variations provoquées par le cabrage de la caisse et par le cabrage du bogie. Dans l'exemple précédent, on trouve pour l'essieu avant qui est le plus déchargé :

$$\Delta D = \frac{\Delta C}{2} + \Delta B = \frac{T}{2}\left(\frac{H - h}{L} + \frac{h}{d}\right)$$

soit, en valeur relative, en supposant au repos, une charge statique $D = \frac{P}{4}$:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{2T}{P}\left(\frac{H - h}{L} + \frac{h}{d}\right)$$

On peut encore remarquer que le rapport T/P est le coefficient d'adhérence et que le déchargement relatif au moment où l'effort maximal de traction est appliqué peut s'écrire pour l'essieu avant :

$$\frac{\Delta D}{D} = 2f\left(\frac{H - h}{L} + \frac{h}{d}\right)$$

La valeur de ce déchargement varie suivant la conception mécanique de la machine ; sur les machines anciennes, il atteignait 20 % alors que sur les machines modernes (BB 16 000 ou BB 9 200) il n'est plus que de 8 % environ.

1.134. Inconvénients du cabrage.

En déchargeant certains essieux, le cabrage diminue l'effort de traction qu'ils peuvent transmettre et augmente les risques de patinage des roues. Les

essieux surchargés ne peuvent pas, pour autant, transmettre un effort plus grand, le couple des moteurs étant limité par les variations d'intensité consécutives au patinage (1).

On lutte contre le cabrage en utilisant des solutions mécaniques qui s'opposent à l'apparition des couples de cabrage ou qui modifient dans un sens favorable les termes intervenant dans la formule du déchargement : bogies à deux pivots, empattement L le plus grand possible, hauteur des pivots au-dessus du rail la plus faible possible ; on est même arrivé à obtenir $h = 0$ (*fig.* 6). Enfin si le patinage intervient, il est encore possible, en jouant sur les caractéristiques d'alimentation des moteurs, de limiter ses effets.

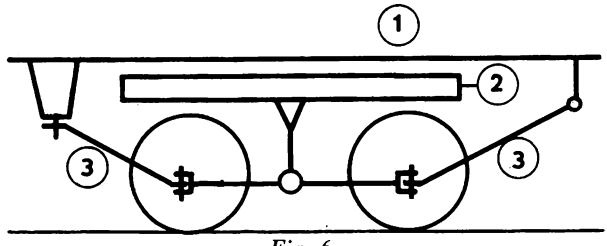


Fig. 6.

1. Caisse.
2. Châssis de bogie.
3. Barres de traction.

Les barres de traction convergent en un point situé sur le rail et au milieu de l'empattement.

1.14. — ORGANISATION MÉCANIQUE D'UNE LOCOMOTIVE

D'un point de vue très élémentaire, une locomotive se compose des éléments suivants :

— *moteurs électriques* associés à leur appareillage et attaquant les roues ;

— *caisse supportant l'équipement* et reposant sur les roues.

Il est évident que bien des fonctions sont ignorées si l'on réduit une locomotive à ses moteurs et à sa caisse. Nous nous proposons donc de définir les fonctions mécaniques importantes de la locomotive, sans pour autant indiquer toutes les solutions possibles ou utilisées (2).

(1) Cette conclusion n'est plus tout à fait vraie si les moteurs sont constamment couplés en parallèle : locomotives à redresseurs ou diesel-électriques.

(2) Nous regrettons de ne pouvoir développer cette étude, qui nous amènerait à des considérations n'ayant plus de rapport avec la technologie d'électricité. Nous voulons simplement montrer, par quelques exemples, qu'il est très difficile, voire impossible, de dissocier la partie électrique de la partie mécanique.

Il est possible dans une première analyse élémentaire de définir les fonctions suivantes :

— *transmission du couple moteur* aux roues ;
— *transmission de l'effort de traction à la caisse.*

Afin de soustraire le matériel aux chocs et vibrations provoqués par les défauts de la voie, on a intérêt à isoler des roues, par l'intermédiaire d'éléments déformables, le maximum d'organes de la locomotive. C'est là le rôle des suspensions.

1.141. Liaison entre les moteurs et les roues.

Il serait possible de concevoir une locomotive réduite à une caisse reposant sur les essieux par l'intermédiaire des organes de suspension. Cette technique (utilisée sur les 2D2) est maintenant abandonnée et les locomotives modernes groupent les essieux sur des châssis secondaires appelés bogies (1).

La *figure* 7 schématise les deux principes utilisés, suivant que les engrenages sont suspendus ou non. Les transmissions représentées sur les *figures* 8 appartiennent au type à engrenages suspendus (Alsthom et Jacquemin), tandis que la transmission à disques (B.B.C.) appartient au type à engrenages non suspendus (*fig.* 9).

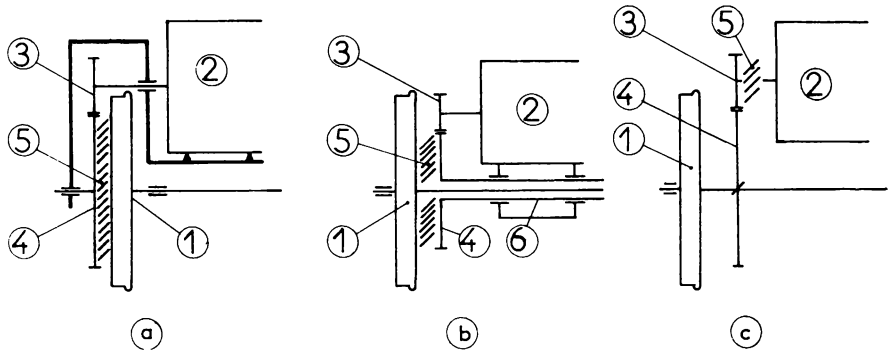


Fig. 7. — *a.* Engrenages suspendus, essieu moteur à fusées intérieures.
b. Engrenages suspendus, essieu moteur à fusées extérieures.
c. Engrenages non suspendus.

1. Roue motrice.
2. Moteur.
3. Pignon moteur.
4. Roue dentée.
5. Liaison élastique entre 3 et 4.
6. Arbre creux.

(1) La désignation s'effectue sur les conventions suivantes : les essieux groupés dans un même bogie, sont désignés par une lettre dont le rang alphabétique indique le nombre d'essieux. Le nombre de lettres correspond au nombre de bogies. Ex. : BB, 2 bogies comportant chacun 2 essieux moteurs ; CC, 2 bogies de 3 essieux moteurs chacun. Dans les anciennes locomotives, les essieux porteurs étaient désignés par un chiffre représentant leur nombre ; *ex.* : 2D2, 2 essieux porteurs à l'avant, 4 essieux moteurs répartis sur un seul châssis, 2 essieux porteurs arrière. Actuellement, on ne construit que des locomotives à essieux moteurs, appelées, pour cette raison, locomotives à adhérence totale.

TRANSMISSION A ANNEAU DANSANT

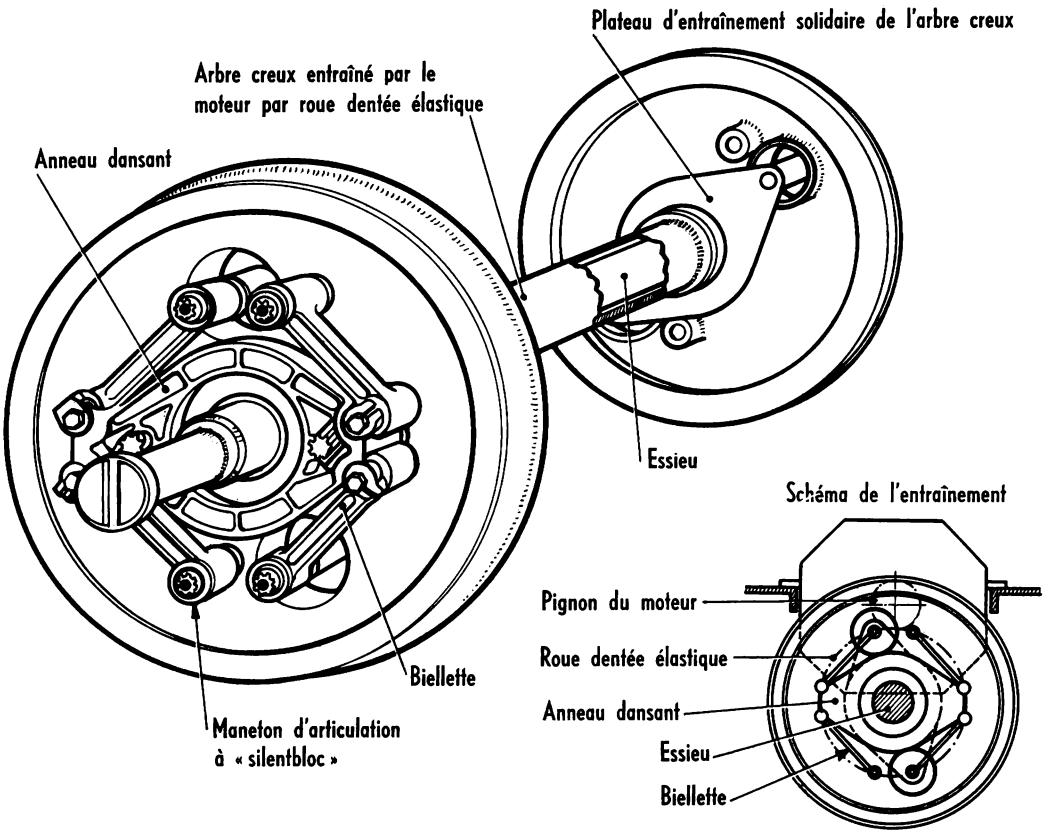
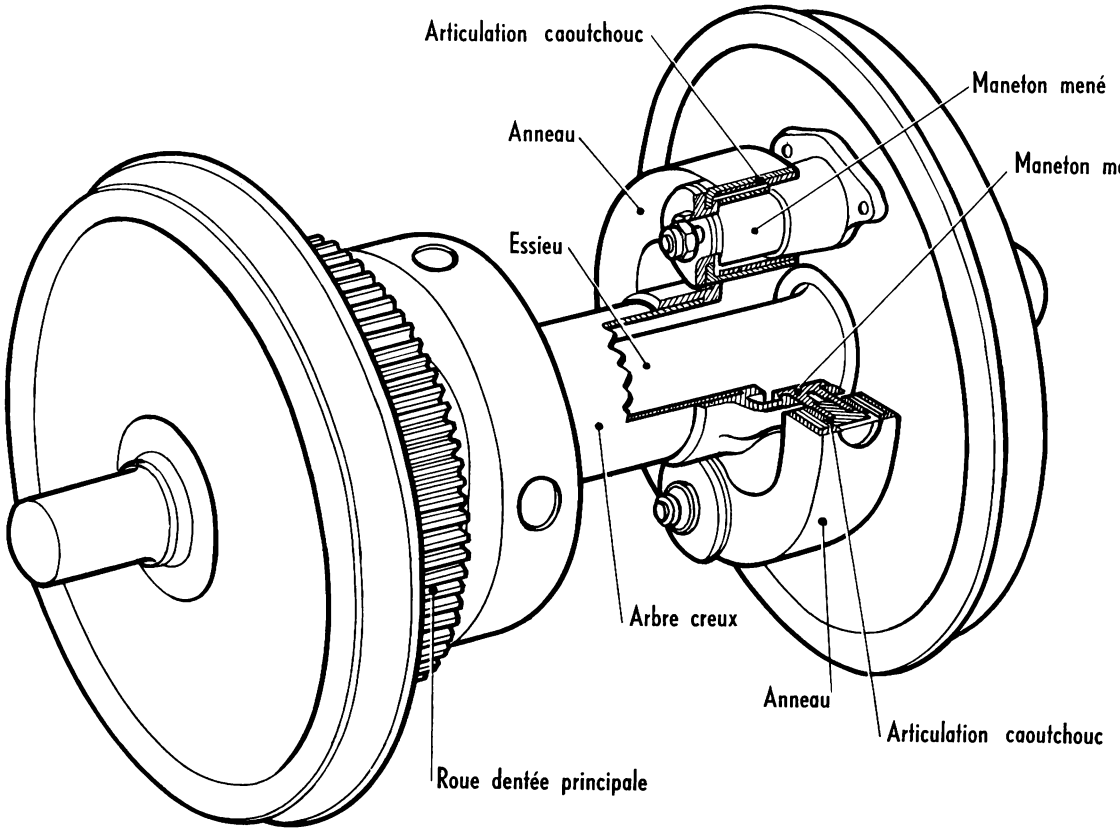


Fig. 8 bis.

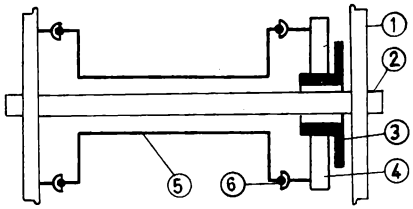
(Document S.N.C.F.)



TRANSMISSION JACQUEMIN " A CARDANS "

Fig. 8 ter.

(Document S.N.C.F.)



Transmission à cardans type « Jacquemin »

1. Roue.
2. Essieu.
3. Pivot (fixé sur carter d'engrenages ou carcasse du moteur).
4. Roue d'engrenage.
5. Arbre creux.
6. Articulation souple.

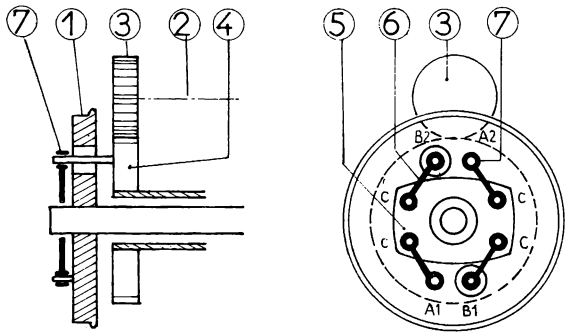


Fig. 8. (Voir aussi *fig.* 8 *bis* et 8 *ter*, pages 256-257.)
Transmission Alsthom à anneau dansant

1. Roue motrice.
2. Moteur.
3. Pignon moteur.
4. Roue dentée.
5. Cadre d'entraînement (anneau dansant).
6. Biellette.
7. Articulation à silentbloc.

Les manchons A_1, A_2 sont solidaires de la roue de roulement, les manchons B_1 et B_2 sont solidaires de la roue dentée tandis que les manetons C sont solidaires du cadre.

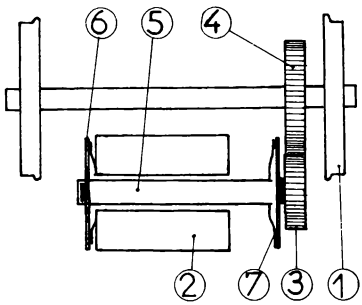


Fig. 9.
Transmission B.B.C. à disques

1. Roue de roulement.
2. Induit moteur.
3. Pignon moteur.
4. Roue dentée.
5. Arbre de torsion.
6. Disque de liaison entre induit et arbre.
7. Disque de liaison entre arbre et pignon.

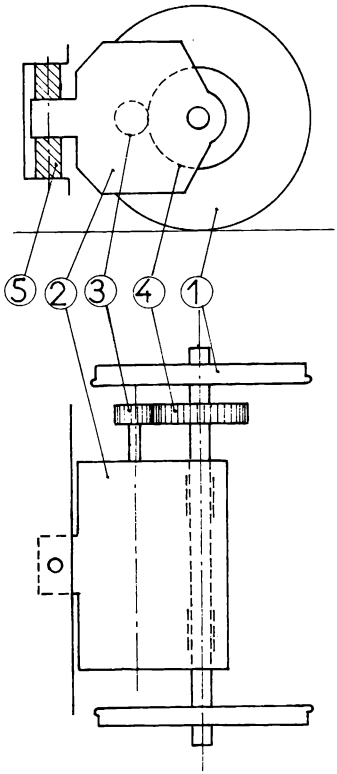


Fig. 9 *bis.*

1. Roue motrice.
2. Moteur.
3. Pignon moteur.
4. Roue dentée.
5. Silentbloc ou ressort.

Une autre solution, beaucoup moins parfaite, consiste à suspendre partiellement le moteur, suivant le principe de la *figure* 9 *bis*. Cette disposition, dite à moteur suspendu par le nez, est de plus en plus abandonnée au profit du moteur entièrement suspendu. On la rencontre seulement sur certaines machines légères, telles les automotrices. Le nez repose sur le châssis de bogie par l'intermédiaire de ressorts ou de blocs en caoutchouc.

1.142. Cinématique de l'ensemble bogie-moteurs.

Le bogie peut comporter un moteur par essieu ou un seul moteur commandant les deux ou trois essieux. Le bogie monomoteur, en réalisant un couplage mécanique des essieux, améliore l'adhérence de la locomotive et présente quelques autres avantages : empattement réduit, gain de poids, et surtout possibilité de disposer facilement de deux rapports de réduction permettant ainsi d'adapter la locomotive à la traction des trains légers à grande vitesse ou des trains lourds à faible vitesse. Dans le système illustré par la *figure* 10, le changement de rapport se fait à l'arrêt ; dans d'autres systèmes, un dispositif de synchronisation permet d'effectuer le changement de rapport en marche.

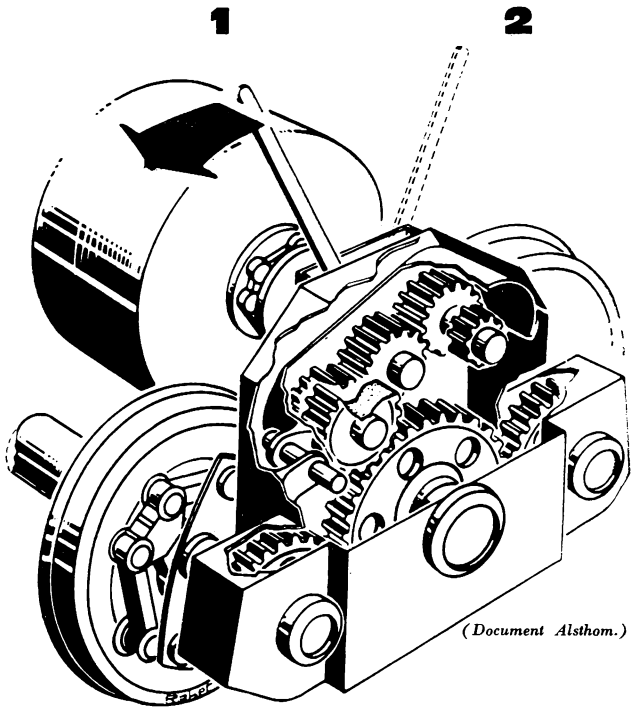


Fig. 10.

Position 1 : réduction voyageurs.

Position 2 : réduction marchandises.

1.143. Liaison entre bogie et essieux.

Les roues sont en contact avec la voie qui n'est pas nécessairement plane. Le châssis de bogie, rigide, est lié aux essieux par l'intermédiaire de la suspension primaire (*fig.* 10 *bis*). Il faut de plus :

— *transmettre au bogie* l'effort longitudinal des essieux ;

— *assurer le guidage* transversal du bogie par rapport aux essieux ;

— *stabiliser les bogies* afin d'éviter ou d'enrayer les mouvements parasites dont ils peuvent être affectés.

L'entraînement longitudinal peut être réalisé par des plongeurs, des biellettes entre boîtes d'essieux et bogie, ou un bras (*fig.* 11, 12, 13).

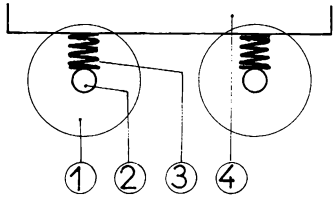


Fig. 10 *bis a.*
Suspension par ressorts indépendants :
1. Roue.
2. Boîte d'essieu.
3. Ressort.
4. Châssis de bogie.

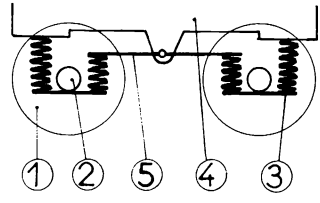


Fig. 10 *bis b.*
Suspension par balancier équilibreur.
1. Roue.
2. Boîte d'essieu.
3. Ressort.
4. Chemin de bogie.
5. Balancier.

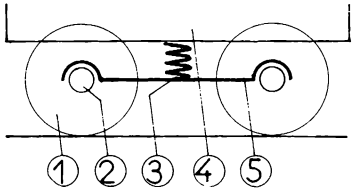


Fig. 10 *bis c.*
Suspension par balancier à un ressort
1. Roue.
2. Boîte d'essieu.
3. Ressort.
4. Châssis de bogie.
5. Balancier.

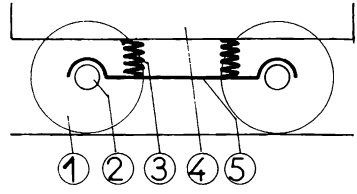


Fig. 10 *bis d.*
Suspension par balancier à deux ressorts.

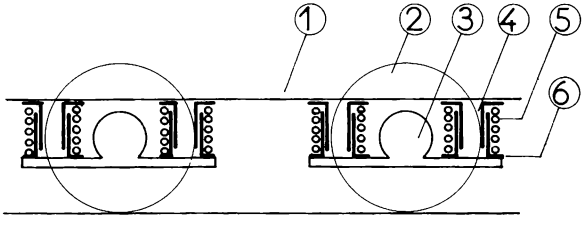


Fig. 11. — Entraînement longitudinal par plongeurs.
1. Châssis de bogie.
2. Roue motrice.
3. Boîte d'essieu.
4. Plongeur.
5. Ressort de suspension.
6. Douille de glissement.

Le guidage latéral est assuré par des glissières latérales, ou plus simplement par la raideur des articulations ou des transmissions.

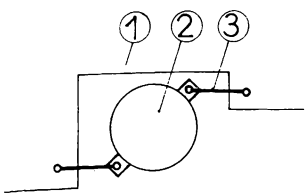


Fig. 12. — Entraînement longitudinal par biellettes.
1. Châssis de bogie.
2. Boîte d'essieu.
3. Biellette.

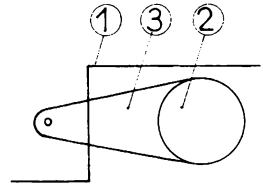


Fig. 13. — Entraînement longitudinal par bras sur la boîte d'essieu.
1. Châssis de bogie.
2. Boîte d'essieu.
3. Bras de liaison.

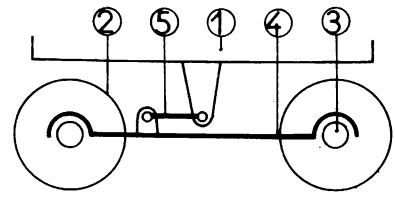


Fig. 13 *bis.*
Entraînement longitudinal par biellette et balancier.
1. Châssis de bogie.
2. Roue.
3. Boîte d'essieu.
4. Balancier.
5. Biellette.

1.144. Liaison entre bogie et caisse.

Elle doit assurer plusieurs fonctions :

— *transmission aux bogies* de la charge de la caisse par un appui vertical ;

— *transmission des efforts* de traction et de freinage par un entraînement longitudinal ;

— *guidage latéral* pouvant s'opposer aux contraintes transversales provoquées par la force centrifuge et les effets aérodynamiques ;

— *rotation du bogie* pour l'inscription en courbe.

Les *figures* 14, 15, 16 indiquent quelques solutions parmi les plus utilisées.

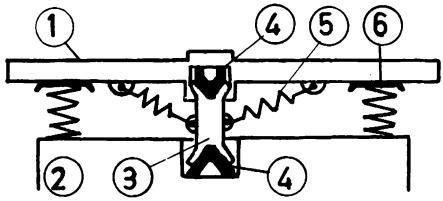


Fig. 14. — Suspension par pivot béquille.
1. Caisse. — 2. Bogie. — 3. Pivot. — 4. Cône en caoutchouc. — 5. Biellette élastique latérale. — 6. Equilibreurs latéraux.

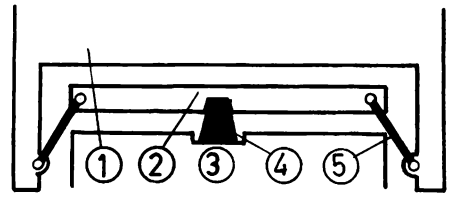


Fig. 15. — Suspension pendulaire à pivot.
1. Caisse. — 2. Traverse de charge. — 3. Bogie. — 4. Pivot axial. — 5. Equilibreurs latéraux.

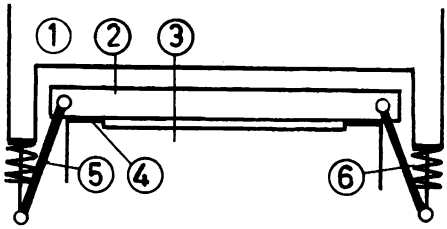


Fig. 16. — Suspension pendulaire à lisoirs.
1. Caisse. — 2. Traverse de charge. — 3. Bogie. — 4. Lisoirs. — 5. Biellette d'équilibre latéral. — 6. Ressort.

1.2. — MOTEUR

1.21. — CHOIX DU TYPE DE MOTEUR

Bien qu'il soit possible à première vue, d'envisager l'utilisation d'un moteur de type quelconque, le moteur à excitation série s'est imposé universellement pour plusieurs raisons. Nous en examinerons quelques-unes en comparant les comportements d'un moteur dérivation et d'un moteur série.

1.211. Effets des variations de tension.

Le couple d'un moteur dérivation dépend, par le flux, de la tension appliquée. Le moteur série peut développer un couple maximal sous une tension quelconque. L'effet d'une chute de tension se traduit, sur un moteur série, par une diminution de la vitesse alors que, sur un moteur dérivation, il y a une diminution du couple maximal.

1.212. Appel de courant lors des variations de couple.

Pour deux moteurs de même puissance à la même vitesse et à la même tension, les courbes C(I) se coupent au point de fonctionnement correspondant au régime nominal. Du fait des allures des caractéristiques de couple (droite pour le moteur dérivation, parabole pour le moteur série), les caractéristiques se placent l'une par rapport à l'autre, comme l'indique la *figure* 17. On remarque qu'en surcharge, pour un même couple, le moteur série exige un courant plus faible. En dessous de la puissance nominale, pour une même variation de couple, le moteur série demande une variation d'intensité plus faible, ce qui permet de limiter les variations de tension en ligne.

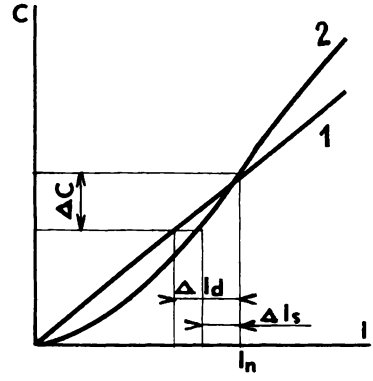


Fig. 17.
1. Caractéristique du moteur dérivation.
2. Caractéristique du moteur série.

1.213. Souplesse d'utilisation.

De par la forme de ses caractéristiques mécaniques C(N), le moteur série est apte à assurer un service varié : traction de trains lourds à faible vitesse,

ou de trains légers à grande vitesse (*fig.* 18). Si le profil de la ligne comporte des rampes, la puissance nominale est déterminée de façon que le passage de la rampe la plus importante soit possible. Dans ces conditions, la vitesse moyenne est plus élevée avec le moteur série (*fig.* 19).

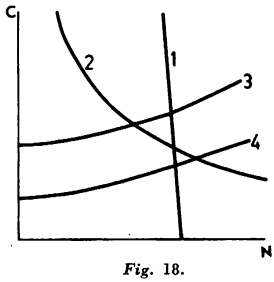


Fig. 18.
1. Caractéristique moteur dérivation.
2. Caractéristique moteur série.
3. Caractéristique train lourd.
4. Caractéristique train léger.

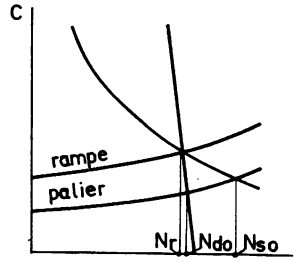


Fig. 19.
N_r : vitesse de rotation du moteur pour la rampe la plus élevée.
N_{do} : vitesse en palier du moteur dérivation.
N_{so} : vitesse en série du moteur série.

1.214. Sensibilité aux flashs.

En cas de variation de tension, les variations de l'intensité sont plus importantes sur un moteur dérivation. De plus, les variations de flux sont très lentes à cause de la grande inductance des enroulements d'excitation ; pendant la période d'établissement du flux, la distorsion est considérable dans un moteur dérivation, ce qui l'expose davantage à l'amorçage entre lignes de balais.

1.215. Effets d'une inégalité du diamètre des roues.

Une différence dans le diamètre des roues a pour effet de déplacer les caractéristiques F(v) des différents moteurs ; le même résultat est d'ailleurs atteint avec des moteurs attaquant des roues de même diamètre, mais ayant des caractéristiques C(N) légèrement différentes (*fig.* 20). Avec une excitation dérivation, l'écart entre les efforts des différents moteurs est considérable, d'où un risque de surcharge de certains moteurs. Pour l'excitation série, l'écart est minime.

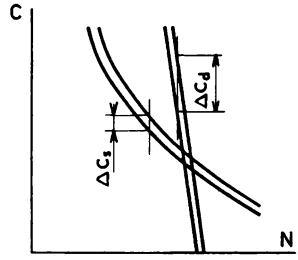


Fig. 20.

1.22. — CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Les deux paramètres les plus importants et les plus directement utilisables par l'exploitant d'une locomotive sont :

— l'effort de traction F ;
— la vitesse de traction v.

La courbe F(v) se déduit de la relation C(n) des moteurs par les considérations suivantes :

$$v = nk\pi D$$

Fig. 21. — Efforts de traction en fonction de la vitesse et de l'intensité du courant.

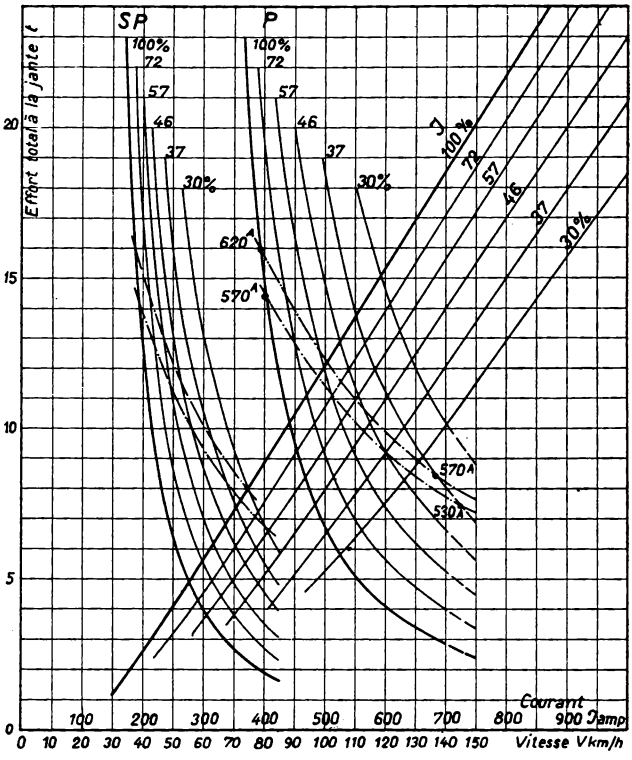


Fig. 21.

Documents Oerlikon concernant les moteurs 6 F 830-1 500 V et la locomotive BB 9003.
W = puissance utile en kw à la jante.
F = effort de traction en kg à la jante.
η = rendement total moteur et engrenages en %.
V = vitesse en km à l'heure.
Vitesse en tours par minute = 11 × V.
Indices 100 ... 30 = excitation en %.
SP : couplage série parallèle.
P : couplage parallèle.
Remarque : Les graduations des axes peuvent être obtenues en unités SI en remplaçant les kg par des décenewtons et en multipliant par 10 les nombres représentant des tonnes en vue d'obtenir des kilonewtons.

v : vitesse (en m/s) ;
n : vitesse de rotation du moteur (en tr/s) ;
k : réduction du train d'engrenages ;
D : diamètre des roues motrices (en m).

La puissance à la jante a pour valeur :

$$P = Fv.$$

Sur le moteur, elle peut s'exprimer par la formule :

$$P = C\omega$$

En faisant intervenir le rendement du train d'engrenage, on peut écrire :

$$Fv = C\omega\eta,$$

ou encore, en remplaçant v par la valeur indiquée précédemment et ω par $2\pi n$:

$$Fnk\pi D = 2\pi nC\eta$$

$$F = \frac{2C\eta}{kD}$$

La *figure* 21 indique les caractéristiques concernant une locomotive.

Remarquons que dans l'expression donnant l'effort aux jantes, seul le terme C est variable. Or, la valeur du couple, proportionnelle à l'intensité absorbée par l'induit, est de la forme :

$$C = \frac{N\Phi I}{2\pi}$$

Il est donc possible de graduer la caractéristique F(v) en intensité.

1.23. — RÉGLAGE DE LA VITESSE

Le point de fonctionnement est défini par l'intersection de la courbe F(v) de la locomotive avec la courbe R(v) du train remorqué. Pour obtenir une vitesse différente, il est nécessaire de déplacer la caractéristique F(v), de façon à déplacer le point de fonctionnement. A cet effet, plusieurs solutions sont possibles et on peut les utiliser isolément ou simultanément :

◆ **Modification du rapport de réduction des engrenages entre le moteur et les roues.** Cette disposition est adoptée sur certaines locomotives, ce qui permet de les utiliser soit pour des trains lourds à vitesse réduite, soit pour des trains légers à vitesse élevée (*fig.* 22).

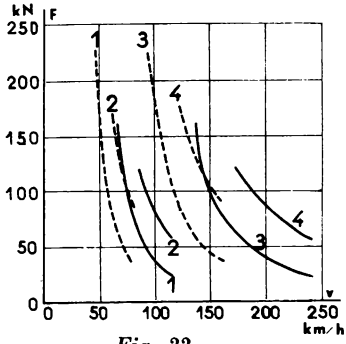


Fig. 22.

En pointillé : réduction P.V. En trait plein : réduction G.V. 1. Couplage série, champ maximal. — 2. Couplage série, champ minimal. — 3. Couplage parallèle, champ maximal. — 4. Couplage parallèle, champ minimal.

◆ **Modification de la tension aux bornes des moteurs suivant des techniques diverses :**

— couplages série, série-parallèle, parallèle, sur les moteurs à courant continu ;

— modification du rapport de transformation du transformateur sur les machines à courant monophasé ou équipées de redresseurs au silicium ;

— déplacement du point d'amorçage sur les locomotives à redresseurs commandés ;

— modification de l'excitation de la génératrice ou de l'alternateur sur les locomotives diesel-électriques.

◆ **Insertion d'une résistance en série avec l'induit** (cas des machines à courant continu) ;

◆ **Réduction du courant d'excitation.**

En utilisant ces divers moyens, on arrive ainsi à couvrir le plan F(v) de caractéristiques suffisamment rapprochées.

1.24. — TECHNOLOGIE DES MOTEURS

Les moteurs de traction doivent fonctionner sur du matériel roulant et ils sont soumis, de ce fait, à des contraintes supplémentaires par rapport aux moteurs stationnaires :

— *vibrations et chocs mécaniques* dus aux aiguillages et autres défauts de la voie ;

— *variations climatiques* beaucoup plus accusées ;

— *atmosphère pouvant être poussiéreuse ou humide.*

Par ailleurs, une panne de moteur sur une locomotive a toujours des conséquences graves : immobilisation du train sur la voie, perturbation du trafic, immobilisation de la locomotive pendant la remise en état.

Les solutions adoptées pour obtenir des moteurs de haute qualité confèrent aux moteurs de traction quelques caractères particuliers. Nous indiquerons rapidement les plus typiques.

La nature du courant d'alimentation (continu, redressé alternatif) a une influence sur la constitution des moteurs, mais on retrouve, sur tous les types, les mêmes préoccupations des constructeurs en ce qui concerne le choix des matériaux, les températures de fonctionnement, le refroidissement, les liaisons entre moteur et roues, la suspension.

Les moteurs modernes sont tous étudiés pour fonctionner en classe H, soit à des températures maximales de 160 °C pour l'induit et de 180 °C pour les inducteurs. Le collecteur ne doit pas dépasser 105 °C pour des raisons de tenue mécanique et de commutation. Les températures effectivement atteintes en fonctionnement normal ne sont inférieures que de quelques degrés à ces valeurs maximales, ce qui montre à quel point les moteurs sont poussés. Le refroidissement présente une très grosse importance ; l'évacuation des pertes est assurée par une ventilation forcée dans le sens axial. Des dispositions sont prises afin d'augmenter l'efficacité de la ventilation :

— *choix d'isolants* ayant une bonne conductibilité thermique, réduction de leur épaisseur, voire suppression totale sur certaines spires des inducteurs ;

— *montage de chicanes* ou dispositions des enroulements inducteurs de façon à assurer une bonne répartition de l'air ;

— *masticage des canaux* de ventilation pour éviter le dépôt des poussières sur des surfaces qui ne seraient pas suffisamment lisses.

— *utilisation généralisée des balais divisés.*

L'amélioration du rendement a été un souci constant des constructeurs ainsi que la diminution de l'encombrement et du poids. A cet effet, les dimensionnements des circuits magnétiques font toujours l'objet d'études très poussées. Les conducteurs divisés, ou de forme spéciale, sont parfois utilisés de façon à diminuer les pertes par courants de Foucault ; les densités de courant admissibles ont été majorées, les paliers à roulements ont remplacé les paliers à coussinets lisses.

Un gain de poids important peut être réalisé en allégeant les parties inactives du point de vue magnétique ou électrique ; c'est ainsi que l'arbre classique plein supportant un croisillon d'induit a été souvent remplacé par un arbre creux coulé ; sur certaines locomotives, les moteurs des deux essieux d'un même bogie sont placés côte à côte en sorte que le flux des deux moteurs passe en même temps par les deux carcasses, ce qui conduit à une diminution du poids des carcasses.

TABLEAU I

Type de moteur.....	M 1 T (1)	SW 408 (1)	TAB 660 (1)	GLM 1033 (3)	TA 628 C	GLM 931 B
Locomotive	BB 8100	BB 9400	BB 8500	2 D 2 9100	CC 7144/158	BB 9200
Année de construction	1948	1959	1964	1950	1954	1957
Tension en V	750	1 500	1 500	1 500	750	1 500
Puissance continue sur l'arbre en kW.	525	1 105	1 290	923	540	963
Vitesse correspondante en km/h.....	46,5	61	49 (2) - 82	70,5	101	93
Compensation	oui	oui	oui	oui	non	oui
Excitation minimale	0,24	0,30	0,40	0,29	0,33	0,24
Vitesse maximale en km/h.....	105	130	90 - 150	160	164	160
Vitesse maximale du collecteur en m/s.	48	50	51,7	50,3	48,5	47,4
Débit d'air en m^3/mm	90	192	180	150	110	90
Masse par kW en kg	12	5,7	4,03	9,3	6,5	5,22

(1) Locomotives pour services mixtes voyageurs, marchandises.
(2) Bogies à deux rapports de réduction.
(3) Locomotives à grande vitesse.

Les opérations d'entretien courant ont été réduites au minimum et ne concernent guère que le graissage et l'inspection périodique des balais et du collecteur. Les porte-balais sont montés sur une couronne tournante pouvant amener successivement tous les balais devant les portes de visite. La rectification du collecteur est quelquefois possible sur la locomotive elle-même.

Toutes ces recherches ont été largement payantes puisqu'en quarante ans le rendement des moteurs est passé de 0,60 à 0,95, tandis que les masses spécifiques ont diminué de 25 kg/kW à 4 kg/kW. Dans le même temps, les revisions générales s'espaçaient de plus en plus, au point qu'actuellement les moteurs parcourent couramment 1 million de kilomètres (soit trois fois la distance Terre-Lune) sans aucun incident de fonctionnement.

Nous examinerons maintenant les incidences de la nature du courant d'alimentation sur les particularités technologiques des moteurs.

1.241. Moteurs à courant continu.

Par rapport aux moteurs ordinaires, étudiées dans la première partie, ils ne présentent que des différences portant sur le choix des matériaux : cuivre allié à l'argent pour le collecteur, en vue d'une meilleure résistance mécanique aux températures éleveés, isolants de qualité spéciale (1).

◆ **Circuit magnétique.** La carcasse et les pôles de commutation sont toujours massifs, en acier moulé ; les pôles principaux sont feuilletés.

◆ **Enroulements.** La tension de fonctionnement est toujours élevée, 1 500 V en général, et plus rarement 750 V pour des faibles puissances. La tension entre lames du collecteur ne peut guère dépasser 18 à 20 V, la valeur moyenne étant le plus souvent de 15 à 16 V, ce qui conduit à un nombre important de lames entre deux pôles successifs. La tenue mécanique et la commutation imposent des vitesses inférieures à 60 m/s à la périphérie du collecteur. Pour toutes ces raisons, on est conduit à adopter un enroulement parallèle simple imbriqué à connexions équipotentielles, le nombre de pôles étant de 4 ou 6.

Les enroulements de compensation, en diminuant la réaction d'induit, permettent le fonctionnement avec un champ très réduit ; le courant d'excitation peut varier dans le rapport de 1 à 0,24 avec un moteur compensé, et seulement de 1 à 0,33 avec un moteur non compensé. La compensation qui permet d'augmenter la souplesse de la machine (2) est cependant chère et les constructeurs s'efforcent d'augmenter la souplesse des moteurs non compensés en combattant la réaction d'induit par un entrefer progressif sous les pôles principaux.

---

(1) Le terme « traction » se retrouve sur les catalogues des fournisseurs et concerne toujours des matériaux de haute qualité.

(2) Le coefficient de souplesse est défini par le rapport de la vitesse obtenue sous la tension nominale à plein champ à la vitesse avec le champ minimal admissible. Ce coefficient varie de 1,6 (pour les moteurs non compensés) à 2,25 (pour les moteurs compensés).

Le comportement du moteur en régime transitoire est amélioré par un shunt inductif monté sur les enroulements série. En effet, lors d'une brutale remontée de tension en ligne, si le moteur fonctionne à champ réduit, le courant varie beaucoup plus vite à travers le shunt résistant qu'à travers les inducteurs. Le courant dans l'induit variant à une vitesse supérieure, il s'ensuit une forte réaction d'induit, ce qui conduit à une diminution et une distorsion du champ résultant, favorisant ainsi l'apparition des flashes. Le shunt inductif oblige le courant à passer aussi bien dans les inducteurs que dans le shunt. Cette disposition entraîne cependant une augmentation de masse (400 kg sur les machines CC 40100, soit un peu plus de 5 % de la masse du moteur). Sur certains moteurs le shuntage est obtenu par des couplages différents des bobines inductrices, au détriment d'une diminution de l'inductance du moteur, ce qui le rend plus vulnérable aux régimes transitoires.

A titre d'exemple, nous donnons dans le *tableau* I les caractéristiques essentielles de quelques moteurs à courant continu.

1.242. Moteur à courant alternatif.

Ces moteurs sont encore appelés moteurs directs, ce qui sous-entend que la liaison avec le réseau s'effectue sans l'intermédiaire de redresseurs, c'est-à-dire d'une façon plus directe ; il existe toutefois un transformateur entre la caténaire et les moteurs.

◆ **Diagramme de fonctionnement.** Il est absolument indispensable de bien connaître les propriétés de fonctionnement du moteur série à courant alternatif, pour comprendre les particularités de construction.

Afin d'annuler l'inductance de l'induit, la compensation est nécessaire. Elle est réalisée, soit par un enroulement monté en série avec l'induit (comme sur les machines à courant continu), soit par un enroulement fermé sur lui-même. Dans ce dernier cas, le courant qui circule dans l'enroulement de compensation est en opposition de phase avec le courant dans l'induit, comme dans un transformateur d'intensité dont le secondaire est en court-circuit (1).

Comme dans un moteur à courant continu, il apparaît, dans les conducteurs de l'induit, une force électro-motrice induite due au déplacement des conducteurs de l'induit dans le champ des inducteurs ; elle a pour valeur :

$$E' = \frac{p}{a} N n \Phi,$$

en appelant Φ la valeur efficace du flux par pôle.

(1) La compensation n'est pas tout à fait rigoureuse ; il faut tenir compte en effet des fuites de flux entre l'induit (primaire) et les inducteurs (secondaire). L'induit conserve une inductance propre de valeur $L' = L\sigma$, en appelant L l'inductance propre de l'induit non compensé, σ le coefficient de dispersion entre les deux enroulements et en supposant que la résistance de l'enroulement de compensation est négligeable.

Il faut bien voir que cette f.c.é.m. n'est pas due à la présence de courant alternatif dans l'induit ou dans les inducteurs, puisque les spires de l'induit peuvent être assimilées à une bobine dont l'axe est perpendiculaire à la direction du flux inducteur. Il s'agit uniquement d'une f.é.m. d'origine dynamique et non d'origine statique.

Rappelons que la loi d'Ohm appliquée au moteur s'écrit :

$$u = e' + ri + \frac{L di}{dt}$$

soit, en notation complexe :

$$U = E' + rI + Lj\omega I$$

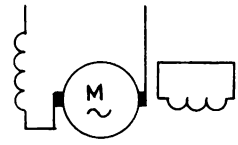


Fig. 23.

Le schéma équivalent est alors celui de la *figure* 23, d'où le diagramme de fonctionnement représenté par la *figure* 24.

Si nous supposons un circuit magnétique non saturé. le point A décrit une demi-circonférence lorsque l'intensité varie. On peut négliger rI devant E′ et écrire :

$E' = k\omega'\Phi$, en appelant ω' la pulsation liée à la fréquence de rotation de l'induit, avec $\omega' = 2\pi n'$.

Comme le circuit est supposé non saturé, on peut poser :

$$\Phi = MI,$$

en appelant M le coefficient de mutuelle inductance entre l'inducteur et une voie de l'induit, d'où, en définitive :

$$E' = M\omega'I$$

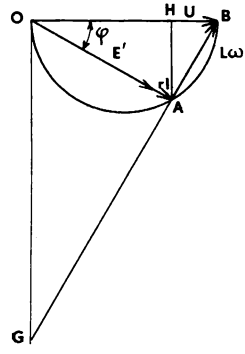


Fig. 24.

Sur le diagramme de fonctionnement, OB étant supposé constant, on voit que :

— le déphasage de I sur U est égal à φ (angle AOB) ;

— le module de I est proportionnel à AB ;

— la vitesse est proportionnelle à $\frac{M\omega'I}{L\omega I}$ soit au rapport OA/AB, c'est-à-dire à ctg φ et, en définitive, à OG ;

— la puissance UI cos φ est proportionnelle à I cosφ, soit à AH ;

— le couple égal à

$$\frac{UI \cos \varphi}{\omega'}$$

est donc pour U constant, proportionnel à

$$\frac{I \cos \varphi}{\omega'}$$

Il est donc proportionnel à AH/OG c'est-à-dire à BH (1) ;

Au démarrage, le point A occupe une position très voisine de O ($E' = 0$, rI faible) ; l'intensité est maximale, de même que le couple, et le facteur de puissance est très faible. La vitesse augmentant, le courant et le couple diminuent tandis que le facteur de puissance s'améliore. A vide, le point de fonctionnement se rapproche de B, ce qui correspond à une grande valeur de OG et le moteur s'emballe.

◆ **Caractéristiques de fonctionnement.**

La vitesse est proportionnelle à la f.c.é.m., comme en courant continu, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E'_1}{E'_2}$$

En courant continu, $E' = U - rI$ (2) est représenté par une droite peu inclinée sur l'horizontale (*fig.* 25), tandis qu'en courant alternatif, la caractéristique $E'(I)$ est de la forme : $E = U - rI - Lj\omega I$.

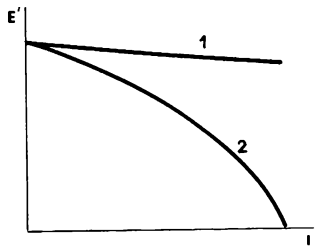


Fig. 25.
1. Moteur à courant continu.
2. Moteur direct à courant alternatif.

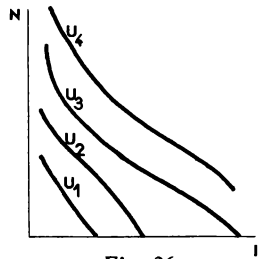


Fig. 26.
$U_1 < U_2 < U_3 < U_4$.

(1) Cette proportionnalité résulte de la similitude des triangles OBG et HBA.

(2) La relation est valable si la réaction d'induit est négligeable, ce qui est le cas lorsque le moteur est compensé.

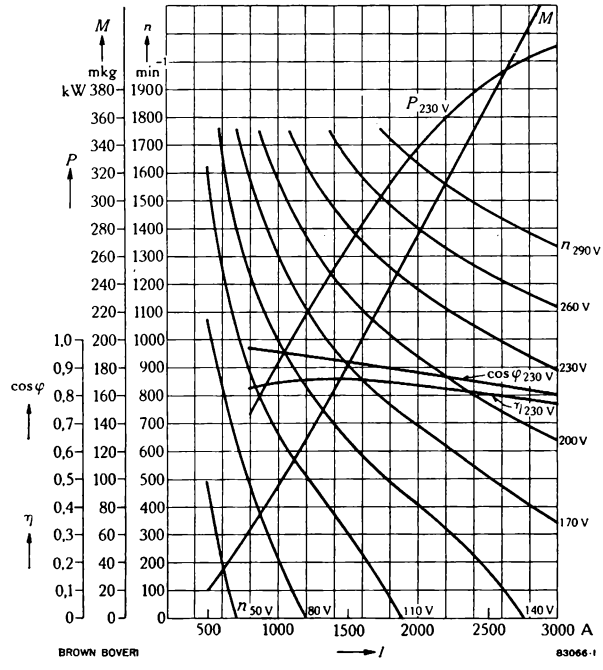
Les caractéristiques n(I) ont la forme indiquée sur la *figure* 26. On remarquera que, pour des tensions faibles, la forte chute de tension inductive a pour effet de faire tomber rapidement les caractéristiques n(I) pour les fortes intensités.

La caractéristique C(I) a la même allure qu'en courant continu et les caractéristiques C(n), déduites des caractéristiques électromécaniques, ont l'allure représentée sur la *figure* 28 ; elles peuvent être graduées en intensité.

◆ Commutation.

Les phénomènes de commutation sont plus complexes et plus gênants qu'en courant continu.

Considérons une spire en commutation, à l'intérieur de laquelle le courant s'inverse. Comme en courant continu, une force électromotrice d'auto-induction accompagne le renversement du courant. Sa valeur — $L dI/dt$ montre que, pour un moteur donné dans lequel l'inductance des sections est bien définie, elle croît avec l'intensité commutée et avec la vitesse de commutation.



(Document B.B.C.)

Fig. 27.

Caractéristiques du moteur série à 50 Hz, type ELM 670 s

n = nombre de tours par minute
M = couple à l'arbre en kgm
P = puissance à l'arbre en kW
η = rendement
cos φ = facteur de puissance
I = courant du moteur en A

REMARQUE. — Les couples indiqués sont exprimés en m $\wedge$ kg ; on peut les obtenir en unités SI (m $\wedge$ N) en multipliant par 10 les nombres de la graduation.
Ces moteurs équipent l'automotrice Z 9052.

Il apparaît également dans la spire une f.é.m. d'origine statique, comme dans un secondaire de transformateur ; en effet, l'axe de la spire en commutation coïncide avec l'axe du flux inducteur. Cette f.é.m. s'appelle f.é.m. de transformation.

Enfin, si l'induit est mal compensé, il apparaît une nouvelle f.é.m. d'origine dynamique due à la rotation du flux de l'induit.

La différence avec les moteurs à courant continu provient de l'existence de la tension de transformation d'origine statique qui subsiste, à l'inverse des autres, même lorsque le moteur ne tourne pas.

Les f.é.m. dynamiques E_d sont en phase avec le courant (la tension induite par la mauvaise compensation de l'induit peut être en opposition si l'induit est surcompensé) et proportionnelles à la vitesse et au courant, tandis que la tension de transformation, proportionnelle au flux et indépendante de la vitesse, est déphasée de $\pi/2$ en arrière par rapport à I. Le diagramme de la *figure* 28 montre que la tension résultante est déphasée d'un angle α par rapport au courant.

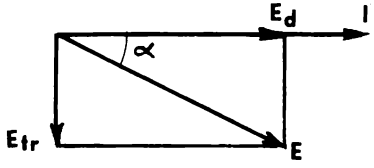


Fig. 28.

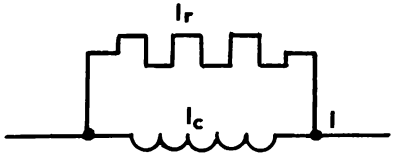


Fig. 29. — Schéma.

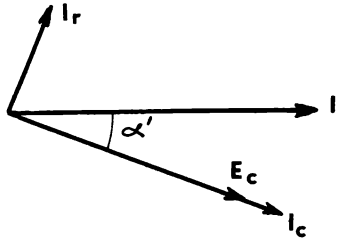


Fig. 30. — Diagramme.

Le pôle de commutation agit par des tensions d'origine dynamique induites dans la spire en commutation, comme en courant continu, donc en phase avec le flux du pôle. Ces tensions de correction ne peuvent donc pas s'opposer complètement à la f.é.m. résultante de commutation E, à moins de les déphaser d'un angle convenable. Le procédé utilisé a été préconisé par Behn Eschenburg et il consiste à connecter l'enroulement du pôle de commutation en parallèle sur une résistance de telle sorte que le courant I_c dans le pôle auxiliaire soit déphasé d'un angle α' par rapport au courant total I. La compensation est rigoureuse quand $\alpha' = \alpha$ puisque à ce moment-là la f.é.m. induite E_c en phase avec I_c peut s'opposer à E (*fig.* 29 et 30).

Mais cette égalité ne peut être obtenue que pour une vitesse déterminée. En effet, pour une valeur de l'intensité donnée, dans le diagramme des tensions de correction induites par le pôle de commutation, les vecteurs sont proportionnels à la vitesse, mais conservent un déphasage constant imposé par les valeurs respectives de la résistance et de la réactance du circuit de commutation. Au contraire, dans le diagramme des tensions de commutation, seules les tensions dynamiques sont proportionnelles à la vitesse, et le diagramme se déforme de telle sorte que la correction est d'autant moins parfaite qu'on s'éloigne davantage de la vitesse à laquelle les diagrammes sont identiques. Autrement dit, pour un moteur donné, α' est constant et α varie avec la vitesse.

En principe, la vitesse de compensation rigoureuse est indépendante de I, puisque toutes les tensions en présence sont proportionnelles à I. En réalité, si l'on tient compte des différences de saturation dans les pôles principaux et de commutation, on s'aperçoit que la tension induite par les pôles de commutation peu saturés est bien proportionnelle à I, mais que la tension à combattre croît moins vite que I à cause de la saturation des pôles principaux. Il en résulte que la vitesse de compensation s'abaisse pour les fortes charges.

Il est possible de déterminer des courbes de « tension résiduelle » dans le plan F (v). Leur forme montre qu'au démarrage, la tension résiduelle a une valeur élevée, due au fait, qu'à ce moment, il n'existe aucune tension de correction alors que la tension statique de transformation est maximale (*fig.* 31). Si le démarrage est pénible, le courant de court-circuit peut détériorer le collecteur.

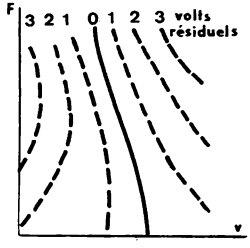


Fig. 31.

L'expérience a montré que la tension résiduelle non dangereuse se situait aux environs de 1 V en service continu, et qu'au démarrage elle pouvait atteindre 3 V sans provoquer d'ennuis sérieux. Notons tout de suite qu'à cause de cette caractéristique, les locomotives monophasées s'accommodent mal d'un démarrage à faible accélération.

Cette tension résiduelle maximale de 3 V est impérative, et tous les paramètres de construction des moteurs directs sont déterminées en fonction de cette valeur.

La tension statique induite a pour valeur, dans chaque section :

$$E_{tr} = \Phi_{max}\omega$$

Φ_{max} étant le flux maximal sous chaque pôle.

Un premier moyen de limiter cette tension statique consiste à choisir une fréquence de fonctionnement de faible valeur (anciennes lignes de tramways interurbains à 25 Hz, réseau nord-américain à 25 Hz, réseaux européens à 16,66 Hz).

Si l'on veut conserver la fréquence 50 (réseau français), la seule solution immédiate apparente consiste à diminuer le flux par pôle, mais on aboutit à des paramètres constructifs de faible valeur en ce qui concerne la tension de fonctionnement et la puissance par pôle.

◆ **Tension de fonctionnement.**

La force contre-électromotrice du moteur a pour valeur :

$E' = nN\Phi$ (dans un enroulement parallèle $p/a = 1$) ;

Par ailleurs, $E_{tr} = \Phi\omega$.

d'où :

$$E' = \frac{nNE_{tr}}{\omega} \quad (a)$$

La relation montre que la f.c.é.m. du moteur est inversement proportionnelle à la fréquence d'alimentation, et que, par suite, la tension d'alimentation des moteurs sera d'autant plus faible que la fréquence sera plus élevée. A priori, cette conséquence ne paraît pas grave, puisqu'il semble possible de compenser cette diminution de tension par une augmentation de l'intensité absorbée par voie.

En réalité, l'intensité admissible pour une voie d'enroulement est elle-même limitée. Soient, en effet :

— e, l'*épaisseur* d'une lame sur le collecteur, y compris l'isolant ;

— v, la *vitesse périphérique* du collecteur (en m/s) ;

— N, le *nombre de conducteurs* sur l'induit ;

— A, la *densité périphérique* (en AC/m) (1) ;

— n, la *vitesse de rotation* (en t/s) (2).

Les sections étant composées d'une seule spire, on peut écrire :

$$v = \frac{N}{2} en$$

$$nN = \frac{2v}{e}$$

et, en reportant cette expression dans (a) :

$$E' = \frac{2vE_{tr}}{e\omega}$$

---

(1) Grandeur définie par le produit : nombre de conducteurs par unité de longueur × intensité dans chaque conducteur. On l'appelle aussi densité linéique et elle s'exprime en Ampères-Conducteurs par mètre.

(2) Pour éviter toute ambiguïté, nous désignons la vitesse de rotation par n chaque fois que, dans une formule, cette grandeur sera associée à un nombre de spires N.

Pour des raisons de tenue mécanique, v doit rester inférieur à 60 m/s à la vitesse maximale de la locomotive, ce qui correspond à environ 40 m/s au régime normal (1), et il n'est guère possible de monter des lames d'une épaisseur inférieure à 5 mm.

En reportant ces valeurs dans l'expression de E′ et en confondant E′ avec la tension d'alimentation U, on trouve les tensions maximales admissibles :

— *pour la fréquence* 16,66 :

$$U = \frac{2 \times 40 \times 3}{0{,}005 \times 16{,}66 \times 6{,}28}$$

soit au maximum 460 V, alors qu'en courant continu les moteurs fonctionnent directement sous 1 500 V ;

— *pour la fréquence* 50, dans les mêmes conditions, la tension maximale serait de 150 V environ.

◆ **Puissance par pôle.**

Le diamètre de l'induit est limité pour des raisons d'encombrement mécanique à 1,4 fois le diamètre du collecteur. La densité périphérique A doit rester inférieure à 50 000-55 000 AC/m. On peut donc écrire les relations suivantes :

$$A \times \pi \times 1{,}4\,D = NI_a$$

avec I_a : intensité par voie d'enroulement.

$$I_a = \frac{55\,000\pi \times 1{,}4D}{N}$$

Nous avons établi précédemment que :

$$\frac{N}{2} e = \pi D$$

et, en admettant $e = 5$ mm, il s'ensuit que :

$$I_a = \frac{55\,000\pi \times 1{,}4D \times e}{2\pi D} = 190A$$

La puissance par pôle $E'I_a$ est donc limitée aux valeurs suivantes :

— un peu moins de 90 kW à la fréquence 16,66 ;

— un peu moins de 30 kW à la fréquence.

(1) La puissance nominale des locomotives est en effet définie aux deux tiers environ de la vitesse maximale.

Ces valeurs sont très faibles, si on les compare aux puissances obtenues en continu (plus de 200 kW par pôle), et elles expliquent le nombre de pôles élevé sur les moteurs directs.

S'il est possible de construire des moteurs pour la fréquence 16,66, sans autres artifices de construction qu'une augmentation du nombre de pôles, ces dispositions deviennent insuffisantes à la fréquence 50. Nous indiquerons rapidement les différentes solutions adoptées :

— *Diminution de la puissance unitaire*, en augmentant le nombre de moteurs. Un même essieu peut être attaqué par deux moteurs montés électriquement en série. Le prix de revient est très élevé : deux moteurs de 400 kW coûtent plus cher qu'un moteur unique de 800 kW.

— *Montage de deux induits* sur le même arbre et dans la même carcasse. Une étude plus détaillée des paramètres de construction montrerait qu'en divisant le flux par pôle, on divise également dans le même rapport la longueur axiale, ce qui permet de loger deux induits sur le même arbre.

— *Enroulement d'induits multiples* à connexions équipotentielles du second ordre. Il est également possible de diminuer la tension statique de commutation en réduisant le nombre de spires de chaque section. Dans les moteurs de traction cette solution apparaît à première vue impossible puisque chaque section ne possède qu'une spire. La difficulté est tournée en disposant sur l'induit un enroulement parallèle double. Des connexions passant sous le fer de l'induit, donc inactives, réunissent l'extrémité arrière des sections du premier bobinage à l'extrémité avant des sections voisines du deuxième bobinage. Le potentiel varie donc d'une lame à l'autre d'une valeur égale à la moitié de la tension appliquée à chaque spire. Cette disposition permet, pour une même valeur de E_{tr} de doubler le flux par pôle, par rapport à l'enroulement simple (*fig.* 32).

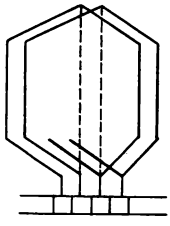


Fig. 32.

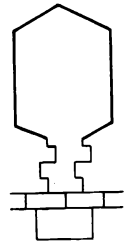


Fig. 33.

— *Induit à connexions résistantes.* Dans cette solution, on tolère une valeur élevée de la tension statique, mais on limite la valeur du courant de court-circuit sous les balais en insérant une résistance entre les lames et la section commutée (BB 13 000) (*fig.* 33).

En dehors de ces dispositions constructives, la commutation est améliorée par le choix des balais et l'utilisation généralisée des balais divisés. Le *tableau* II donne les caractéristiques de quelques moteurs directs.

Tableau II.

Type de moteur	10 HW 895	20 WB 1140	16 WB 880	MS 92
Locomotive	BB RE St-Gothard	BB 20101 bifréquence	CC 25000	BB 13000
Année de construction	1963	1958	1950	1956
Fréquence	16,66	50	50	50
Tension en V	525	280	250	265
Puissance continue sur l'arbre en kW	1 113	785	510	533
Vitesse correspondante en km/h	105	95	68	65
Nombre de pôles	10	20	16	18
Connexions résistantes	non	non	non	oui
F.é.m. de transformation E_{tr}	2,89	4,3	4,1	4,35
Vitesse maximale du collecteur en m/s	49,5	57,5	47	48,2
Débit d'air en m^3/mn	147	130	90	168
Masse par kW en kg.	3,47	5,96	5,88	8,17

1.243. Moteur à courant ondulé.

Ces moteurs sont utilisés sur les locomotives à redresseurs à 50 Hz.

La tension d'alimentation se présente sous la forme de demi-ondes séparées par des intervalles correspondant aux temps de commutation ; elle peut être considérée comme résultant de la somme d'une tension moyenne continue et de tensions harmoniques d'ordre pair, la composante à 100 Hz étant la plus importante.

Le courant peut également se décomposer en une composante continue qui produit le couple utile et une composante alternative de fréquence 100 non sinusoïdale (*fig.* 34).

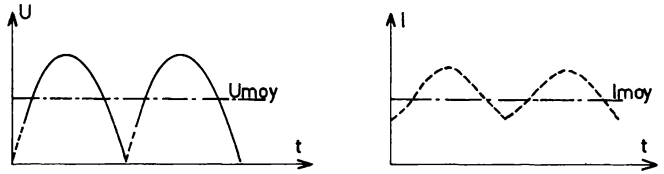


Fig. 34.

Cette composante alternative crée des phénomènes qui modifient toujours dans un sens défavorable les conditions de fonctionnement du moteur. Les inconvénients sont d'autant plus sensibles que le taux d'ondulation est plus élevé.

On peut chercher à éliminer cette composante alternative par un filtrage. On dispose alors une inductance en série avec le moteur et, si le taux d'ondulation ne dépasse pas 15 à 20 %, le fonctionnement des moteurs est très satisfaisant ; il devient alors possible d'utiliser des moteurs conçus pour la marche en courant continu. Les inductances utilisées, bobinées sur noyaux magnétiques droits, ont l'inconvénient d'être volumineuses et lourdes (de l'ordre de 2 000 kg pour obtenir un taux d'ondulation acceptable pour un moteur à courant continu). Aussi préfère-t-on apporter quelques modifications à la construction des moteurs afin qu'ils puissent fonctionner avec un taux d'ondulation plus élevé.

◆ **Effets de l'ondulation du courant.**

On peut citer, parmi les plus importants :

— *variation du couple* autour de sa valeur moyenne, par suite de l'ondulation du courant ;

— *augmentation des pertes* Joule due à ce que la valeur efficace du courant est supérieure à la valeur moyenne, et à l'effet pelliculaire ;

— *production d'une force électro-motrice* de transformation dans la spire en commutation, due à l'ondulation à 100 Hz du flux des pôles principaux. Il faut toutefois remarquer que le problème est

totalement différent de celui des moteurs monophasés. En effet, dans un moteur monophasé l'existence du couple, directement proportionnel au flux, est liée à l'existence de la tension de transformation ; supprimer cette tension est impossible sous peine de supprimer le couple (1). En courant ondulé, le couple moyen dépend des valeurs moyennes du flux et de l'intensité ; il suffit de supprimer les ondulations du flux pour supprimer la tension statique.

◆ **Etude de la commutation.**

— **Cas d'une carcasse massive.**

Les variations de flux induisent dans cette carcasse des courants ; le flux des pôles auxiliaires est en retard sur le courant d'un angle qui dépend de la nature du noyau magnétique, mais qui se situe aux environs de 30°. Il en résulte que le flux des pôles de commutation varie autour de la valeur idéale correspondant à une commutation noire (2).

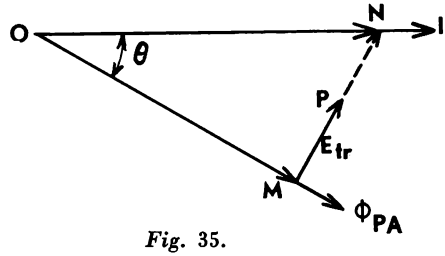


Fig. 35.

Le diagramme de fonctionnement faisant intervenir uniquement les grandeurs alternatives peut être représenté d'une façon simplifiée par la *figure* 35. Le vecteur ON représente la tension idéale à induire dans les spires commutées et OM la tension réellement induite. La tension statique de transformation se place sensiblement suivant MN si bien que la tension résiduelle se traduit par le vecteur PN (3).

---

(1) Dans un moteur direct, cette tension est rendue plus ou moins inoffensive en lui opposant une autre tension, mais elle n'est jamais supprimée ; c'est seulement la tension résultante qui est plus ou moins annulée.

(2) Le terme commutation noire signifie qu'il n'y a pas d'étincelles aux balais. On définit également une zone ou bande noire qui définit l'aptitude d'une machine à supporter sans étincelles des tensions induites non nulles dans les spires en commutation.

(3) Une étude plus détaillée montrerait que la tension E_{tr} est sensiblement proportionnelle à la tension d'alimentation moyenne redressée appliquée aux moteurs. Elle est, de ce fait, très faible au démarrage, malgré les intensités élevées. Il en résulte, pour le moteur à courant ondulé, la possibilité de supporter sans danger des démarrages difficiles.

Il est possible d'éliminer, au moins partiellement, cette tension statique, par un shuntage permanent des inducteurs à l'aide d'une résistance ohmique qui dérive en partie la composante alternative. Pour le fonctionnement à champ réduit, on risque cependant d'amortir par trop les inducteurs, ce qui amène à utiliser un autre shunt inductif disposé sur les derniers crans du rhéostat d'excitation (*fig.* 36).

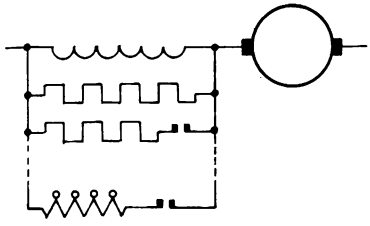


Fig. 36.

Fig. 37.

— **Carcasse feuilletée.**

Comme c'est la nature massive de la carcasse qui entraîne le déphasage du flux sur l'intensité, on peut réduire ce déphasage en utilisant un circuit magnétique entièrement feuilleté. L'absence de courants induits dans la carcasse se traduit par une diminution du déphasage et une modification du diagramme de fonctionnement qui prend alors l'allure de la *figure* 37. La tension E_{tr} est éliminée par un shuntage ohmique permanent des enroulements principaux. Le taux de shuntage, assez important, est de l'ordre de 12 à 15 %.

◆ **Caractéristiques des moteurs.**

Du point de vue technologique, un moteur à courant ondulé est très proche d'un moteur à courant continu. Nous avons déjà dit que si l'on prend la précaution de ne pas dépasser un taux d'ondulation trop élevé, il est possible d'utiliser des moteurs à courant continu.

On note une orientation de plus en plus marquée vers l'utilisation de circuits magnétiques entièrement feuilletés, pour les raisons suivantes :

— *homogénéité des tôles* meilleure que celle de l'acier coulé ;
— *prix de revient plus faible* ;
— *perméabilité plus élevée* ;
— *difficultés moindres de commutation*, la zone noire pouvant être réduite par rapport au moteur à carcasse massive.

La tension de fonctionnement n'étant imposée ni par la valeur de la tension sur la caténaire (comme en courant continu), ni par des impératifs de commutation (comme en courant monophasé), on cherche toujours à réaliser le moteur

pour la tension la plus économique. L'enroulement est du type parallèle simple avec connexions équipotentielles. Jusqu'à 700-800 kW, la tension et l'intensité sont sensiblement égales ; au-delà de cette puissance, il est préférable de réaliser des moteurs à tension relativement basse et à intensité élevée.

Le nombre de pôles est compris entre 4 et 8 et, comme en courant continu, ils peuvent être ou non munis d'enroulements de compensation.

Les pertes supplémentaires sont diminuées par l'utilisation de conducteurs divisés suivant les dispositions indiquées sur la *figure* 38.

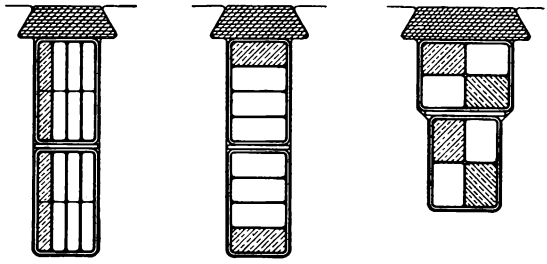


Fig. 38.

Dispositions classiques actuelles des conducteurs dans les encoches.

a. Division en hauteur (moteurs de moyenne puissance à grande longueur de fer).
b. Disposition à plat (moteurs de grande puissance) ;
c. Disposition à chantournement dans l'hélice (moteurs de moyenne puissance.

Un moteur conçu suivant la technique des moteurs monophasés fonctionnerait parfaitement en courant ondulé, mais une telle solution est chère. Par contre, un moteur à courant ondulé fonctionne très bien en courant continu et cette solution est adoptée sur les locomotives bicourant.

1.3. — ÉQUIPEMENT D'UNE LOCOMOTIVE

1.31. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Nous avons déjà signalé la nécessité de disposer de plusieurs caractéristiques F (*v*), afin d'obtenir des vitesses économiques permettant le remorquage de trains lourds à vitesse réduite et de trains légers à vitesse plus élevée. L'équipement doit permettre également :

— le *démarrage aussi régulier* que possible, ce qui implique une accélération constante ;

— la *marche en régime normal* avec le meilleur rendement (moteurs sous pleine tension en courant continu) ;

— le *freinage électrique*, soit rhéostatique, soit par récupération ;

— l'*alimentation de divers auxiliaires* : ventilation, air comprimé, chauffage, signalisation, protection...

1.32. — LOCOMOTIVES A COURANT CONTINU

La tension disponible sur la caténaire est sensiblement constante et l'équipement électrique doit prévoir l'alimentation des moteurs à partir de cette tension. En 1 500 V, les moteurs sont couplés en parallèle en marche normale, tandis qu'en 3 000 V, deux moteurs sont constamment couplés en série.

L'équipement réalise les fonctions suivantes :

— insertion de résistances en série avec les moteurs ;

— couplage des moteurs en série, série parallèle et parallèle ;

— réduction du courant d'excitation.

1.321. Variation de l'effort au cours du démarrage.

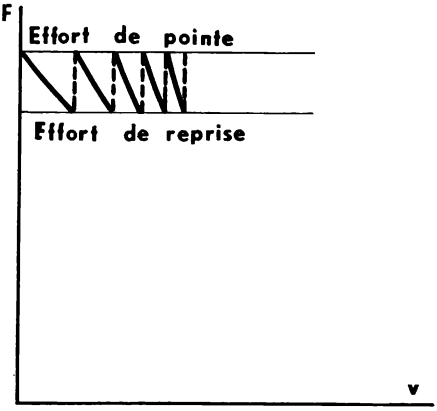


Fig. 39.

La *figure* 39 représente le diagramme définissant l'effort de pointe correspondant au début du passage sur un cran du rhéostat, et l'effort de reprise obtenu à la fin de la période d'accélération sur un cran. Pour obtenir un démarrage sans-à-coups, le rapport

$$\frac{\text{effort de pointe}}{\text{effort de reprise}}$$

doit être aussi faible que possible. On est cependant limité, car une valeur trop faible entraîne un grand nombre de crans sur le rhéostat. En pratique on choisit un rapport compris entre 1,1 et 1,2 pour les locomotives et 1,15 à 1,30 pour les automotrices. Des équipements un peu plus complexes permettent de disposer d'un vernier entre deux crans consécutifs et on obtient alors un rapport de l'ordre de 1,035.

1.322. Couplage des moteurs.

Pour passer d'un couplage à l'autre, par exemple de série à série parallèle, il est nécessaire de réinsérer des résistances en série avec les moteurs afin d'éviter une pointe de courant trop importante. Il est également important de ne pas annuler l'effort moteur, ce qui interdit de couper le circuit pour modifier les connexions. On utilise couramment deux schémas :

— la *méthode du court-circuit* (*fig.* 40), qui présente l'inconvénient de réduire de plus de moitié l'effort moteur pendant le court-circuit ;

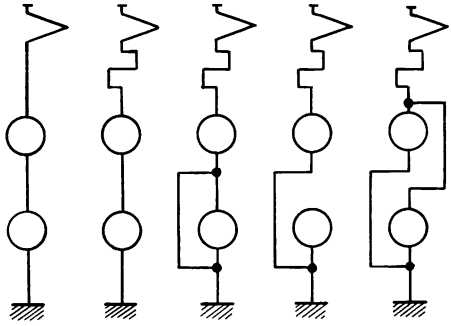


Fig. 40.

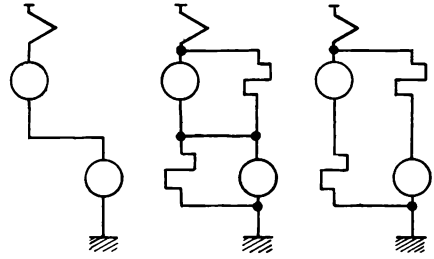


Fig. 41.

— la *méthode du pont* (*fig.* 41). Il est possible de régler la valeur de la résistance R de telle sorte que la liaison entre les deux branches ne soit parcourue par aucun courant au moment de l'ouverture de cette liaison. On obtient ainsi la méthode du pont équilibré. L'intérêt qu'elle présente ne justifie cependant pas la complexité qu'elle entraîne dans l'appareillage, et elle est de plus en plus abandonnée.

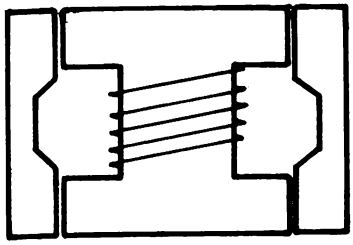
1.323. Réduction du champ inducteur.

Deux schémas sont possibles :

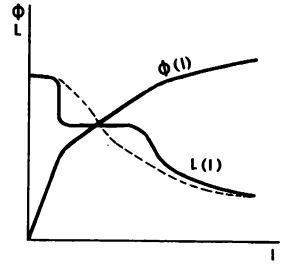
— *réduction par prises disposées sur les inducteurs* ;

— *réduction par shunt.*

Les deux méthodes sont identiques en régime établi, mais nous avons déjà signalé à propos de l'étude des moteurs que le shunt inductif était préférable car il s'oppose à la déformation du champ inducteur pendant les régimes transitoires.



a. Forme du circuit.



b. Caractéristiques obtenues. La caractéristique en pointillé concerne un shunt à faible entrefer sans fuites.

Fig. 42.

La forme du shunt a une grande influence sur les caractéristiques. Afin d'obtenir une inductance $d\varphi/dI$ de valeur élévée en régime transitoire, le circuit magnétique ne doit pas se saturer trop vite. A cet effet, on peut lui donner la forme indiquée sur la *figure* 42.

1.324. Réalisation pratique des équipements.

Les modifications de connexions sont effectuées par des contacteurs. En raison des efforts importants à exercer pour leur fermeture (effort de 1 200 N, distance de coupure de 30 mm) les commandes électromagnétiques ne sont pas utilisées.

Deux types de contacteurs sont couramment utilisés :

— *Contacteur à commande par came* (*fig.* 43). Les contacteurs sont fermés par une came ; les différentes cames sont solidaires d'un arbre et l'ordre de manœuvre est immuable. L'arbre doit avancer pas à pas, accomplissant à chaque manœuvre des fractions de tour correspondant à chaque cran. Sa rotation est assurée, soit par un servo-moteur à air comprimé (système B.B.C.), soit par un moteur électrique entraînant un système plateau-manivelle (système Jeumont).

La commande par arbre à cames présente l'avantage de réaliser un asservissement rigoureux entre les différents couplages, et, à ce titre, elle est employée pour les équipements de transition. Elle ne peut cependant permettre qu'un nombre limité de combinaisons, et si on veut disposer plusieurs arbres à cames, on est amené à prévoir des systèmes de synchronisation et d'asservissement entre eux.

— *Commande par contacteurs pneumatiques* (dite à contacteurs individuels). Ce système apparaît, à priori, plus souple que la commande par arbre à cames, puisqu'il est possible de disposer un nombre quelconque de contacteurs, mais le respect de l'ordre de fermeture implique des asservissements et des verrouillages complexes. La commande des électro-valves se fait par combinateurs.

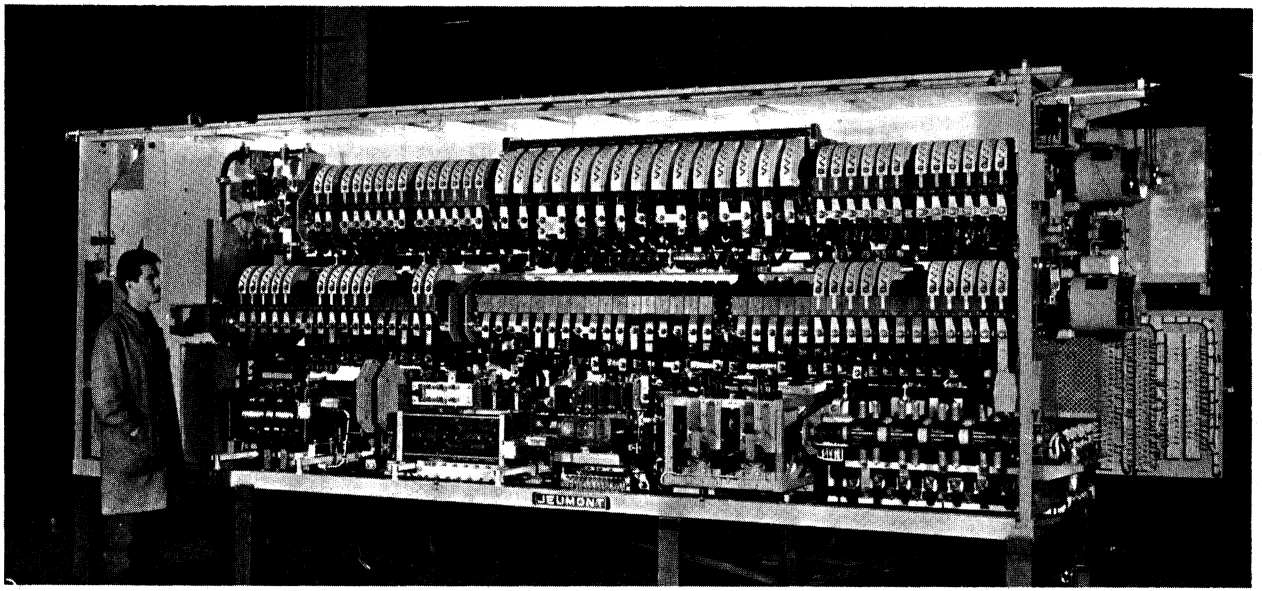


Photo " Etudes et Applications Graphiques "

(Document Jeumont-Schneider)

Fig. 43. — Equipement à arbres à cames. (Ensemble du bloc d'appareillage des locomotives quadricourant CC 40100.)

On trouve de droite à gauche : le servomoteur, le plateau cranté d'entraînement (très peu visible) les contacteurs avec écran et cheminées de soufflage ; deux compartiments d'appareillage auxiliaire.

1.33. — LOCOMOTIVES A MOTEURS MONOPHASÉS DIRECTS

La présence d'un transformateur est indispensable entre la caténaire et les moteurs.

Les moteurs sont constamment couplés en parallèle ; l'appareillage de transition est donc supprimé. Dans quelques rares cas, lorsque l'intensité absorbée est trop importante, on peut réaliser un couplage série parallèle permanent.

Le réglage de la tension aux bornes des moteurs s'effectue par des prises disposées sur le transformateur. Il est possible d'utiliser des prises disposées sur l'enroulement B.T. (*fig.* 44). La S.N.C.F. utilise le réglage sur l'enroulement haute tension suivant les schémas des *figures* 45 et 46. On notera la présence

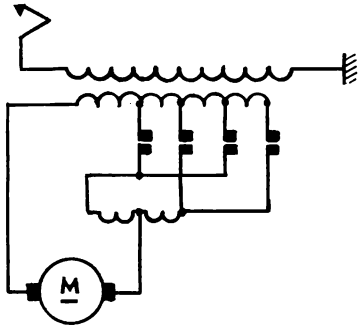


Fig. 44.

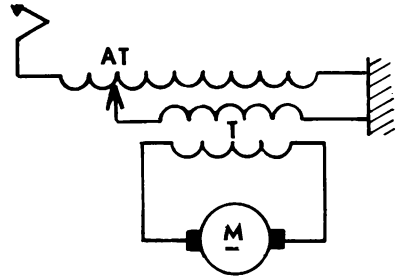


Fig. 45 — Disposition de principe.
AT. Autotransformateur.
T. Transformateur.

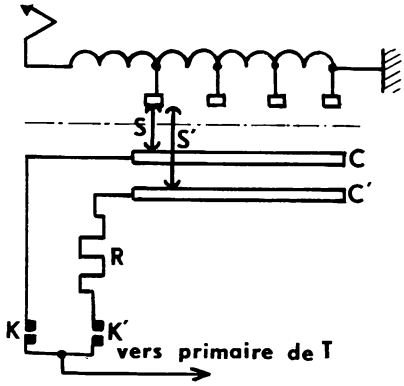


Fig. 46

Ordre des opérations pour passer sur le plot suivant.
— Déplacement de S′ sur le plot désiré.
— Fermeture de K′ (K est déjà fermé).
— Ouverture de K.
— Déplacement de S sur le plot désiré.
— Fermeture de K.
— Ouverture de K′.
— Déplacement de S′ (entre 2 plots).

S.S′. Contacts sélecteurs.
C.C′. Curseurs.
K.K′ Contacteurs à coupure en charge.
R. Résistance de transition.

d'un autotransformateur entre la caténaire et le transformateur proprement dit. Cette disposition évite le surdimensionnement qu'entraînerait la présence, sur le transformateur, de nombreuses prises de réglage. En effet, la tension normale de fonctionnement des moteurs serait obtenue avec un nombre restreint de spires au primaire. Les autres spires seraient complètement inutiles en dehors des périodes de démarrage, mais elles devraient être prévues pour supporter l'intensité de démarrage. Par rapport au réglage B.T., le réglage H.T. entraîne une augmentation de poids du transformateur de l'ordre de 25 %, et une augmentation de la puissance réactive, mais il offre le gros avantage d'opérer sur des intensités faibles.

Le transformateur est construit suivant les techniques traditionnelles ; le refroidissement s'effectue soit par huile, soit, sur des modèles récents, par hexafluorure de soufre gazeux.

1.34. — LOCOMOTIVES A REDRESSEURS

En première approximation, une locomotive à redresseurs comporte :

— un transformateur ;

— un ensemble redresseur ;

— des moteurs constamment couplés en parallèle.

Le réglage de la tension s'effectue, comme pour les locomotives monophasées à moteurs directs, par des prises sur l'enroulement H.T. du transformateur.

1.341. Différents redresseurs utilisés.

Après des périodes d'essai, deux types de redresseurs ont été retenus par la S.N.C.F. :

— *ignitrons* ;

— *diodes au silicium* (1).

1.342. Schémas de montage des redresseurs (fig. 47).

Deux solutions sont utilisables : va-et-vient (push-pull) et pont. Bien que ces deux schémas conduisent à la même forme de courant redressé, ils présentent entre eux quelques différences.

Le montage en pont utilise mieux le secondaire du transformateur et permet de réduire ses dimensions ; il se prête bien au réglage B.T. Il présente l'inconvénient de ne pas mettre toutes les cathodes au même potentiel, ce qui peut être gênant avec certains types de redresseurs.

---

(1) Quelques machines ont été équipées d'excitrons. Actuellement des prototypes sont équipés de thyristors et ce type de redresseur est certainement appelé à un très grand développement.

Le montage en va-et-vient met toutes les cathodes au même potentiel, ce qui permet de n'utiliser qu'une seule source de tension pour l'alimentation des auxiliaires des ignitrons ou des excitrons portés au potentiel de la cathode. Il se

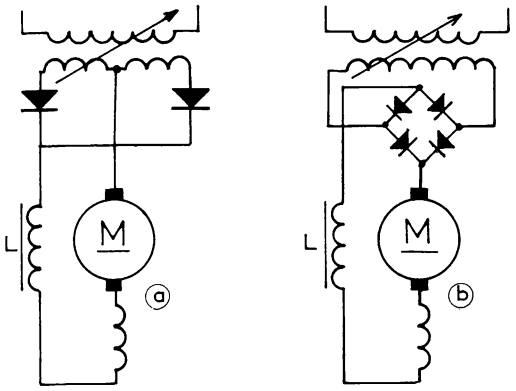


Fig. 47.
a. Montage en va et vient.
b. Montage en pont.
L : inductance de lissage.

prête mal au réglage B.T. et l'utilisation du secondaire du transformateur est moins bonne qu'avec le montage en pont.

Pour toutes ces raisons, les ignitrons et excitrons sont montés en va-et-vient, tandis que les diodes au silicium utilisent les deux montages.

Les performances des ignitrons permettent d'alimenter un moteur à travers deux tubes (un sur chaque branche), alors que les diodes au silicium doivent être montées en série parallèle (1).

Pour tenir compte des dispersions de caractéristiques, et afin de se protéger contre les surtensions et les surintensités, il est impératif de prévoir un coefficient de sécurité important en tension et en intensité.

1.343. Réglage de la vitesse par le champ.

Il est possible, sur une locomotive à redresseurs, de prévoir un réglage de la vitesse, en agissant sur l'excitation des moteurs. Cette disposition permet de réduire le dimensionnement du transformateur. L'intensité d'excitation est réduite au plus de 35 à 40 % environ.

1.35. — LOCOMOTIVES POLYCOURANTS

Le passage d'un train entre deux systèmes de traction différant par la nature, du courant, peut s'effectuer de deux façons :

— *aménagement d'une gare de transition* dans laquelle on effectue un changement de locomotive ;
— *utilisation de locomotives* pouvant fonctionner indifféremment avec les deux types de courant.

(1) Exemple : 336 diodes sur les locomotives CC 40 100 réparties en 6 séries de 14 diodes en parallèle sur chaque bras. Caractéristiques par diode : 1200 V, 250 A. Contraintes maximales réellement appliquées : 506 V, 143 A.

Cette dernière solution, possible avec les locomotives polycourant, évite une perte de temps et réduit le parc de locomotives.

Les principales combinaisons peuvent se présenter de la façon suivante :

— *locomotives à courant continu* bitension pouvant fonctionner sous 1 500 et 3 000 V ;

— *locomotives à courant alternatif* bifréquence, fonctionnant sous 16,66 et 50 Hz ;

— *locomotives fonctionnant en courant continu et alternatif* appelées couramment polycourant : bicourant 50 Hz et 1 500 V continu, tricourant 50 Hz, 1500 et 3 000 V continu, quadricourant 50 Hz, 16,66 Hz, 1 500 V et 3 000 V continu.

Nous indiquerons très sommairement les conditions dans lesquelles sont prévus leurs appareillages.

◆ **Locomotives continu-bitension** : les moteurs sont isolés pour 3 000 V et bobinés pour fonctionner sous 1 500 V, ce qui pose des problèmes quelquefois ardus pour les moteurs auxiliaires de faible puissance. Les moteurs de traction sont couplés par séries de deux sous 3 000 V. Les moteurs des auxiliaires sont, également dans la mesure du possible, alimentés en série. Si cette solution n'est pas possible, il faut prévoir deux collecteurs par induit.

◆ **Locomotives bifréquence** : les moteurs sont étudiés pour fonctionner en 50 Hz et leur alimentation en 16,66 Hz ne pose aucun problème en dehors d'un réglage des pôles de commutation. Le transformateur est prévu pour fonctionner sous la fréquence la plus faible. Une autre solution consiste à utiliser des redresseurs mais elle entraîne un supplément de poids et d'encombrement.

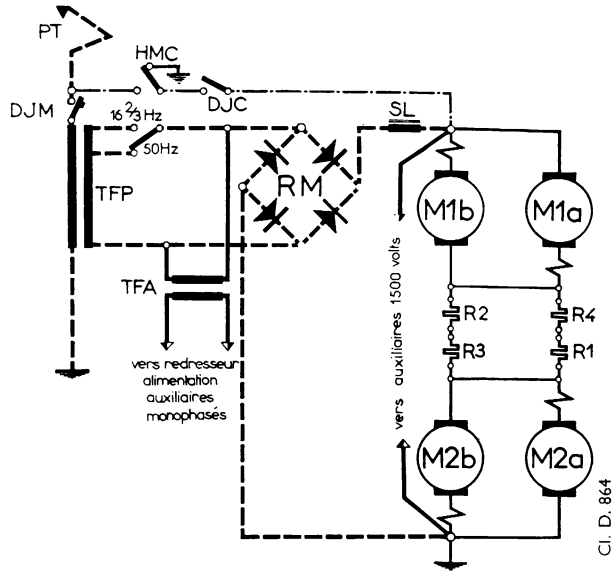
◆ **Locomotives continu-alternatif** : les moteurs étudiés pour être alimentés en courant ondulé fonctionnent directement en courant continu et l'alimentation en courant alternatif se fait par l'intermédiaire de redresseurs, suivant deux formules différentes :

— *équipement traditionnel* en courant continu et équipement alternatif avec graduateur permettant le démarrage en parallèle des moteurs ;

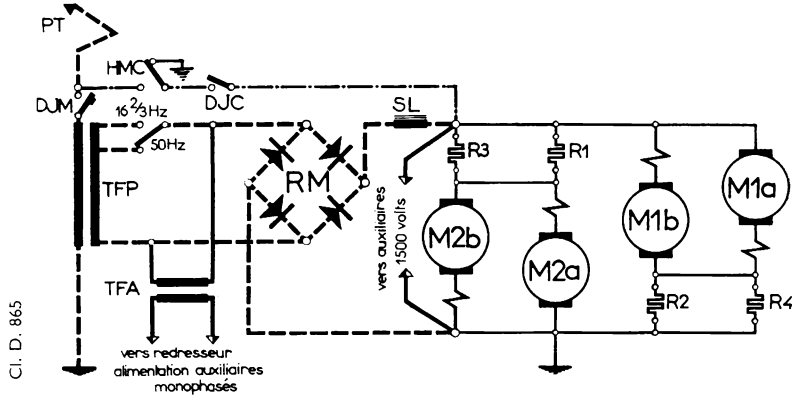
— *équipement à courant continu* utilisé aussi en courant redressé, ce qui conduit à supprimer le graduateur. Les redresseurs délivrent une tension égale à celle de la caténaire continue.

Les solutions adoptées dépendent surtout du service auquel est destinée la locomotive et des possibilités de réalisation dans les limites imposées. Nous indiquons à titre d'exemple l'organisation d'une locomotive quadricourant (*fig.* 48).

Dans toutes les combinaisons, il est absolument indispensable d'établir à coup sûr les connexions entre la caténaire et l'équipement prévu pour le type



COUPLAGE SÉRIE



COUPLAGE PARALLÈLE

Alimentation des moteurs de traction sous caténaires 1 500 V

Alimentation des moteurs de traction sous caténaires 25 kV - 50 Hz où 15 kV - 16 $^{2}/_{3}$ Hz

ALIMENTATION DES MOTEURS DE TRACTION SOUS CATÉNAIRES 3000 V

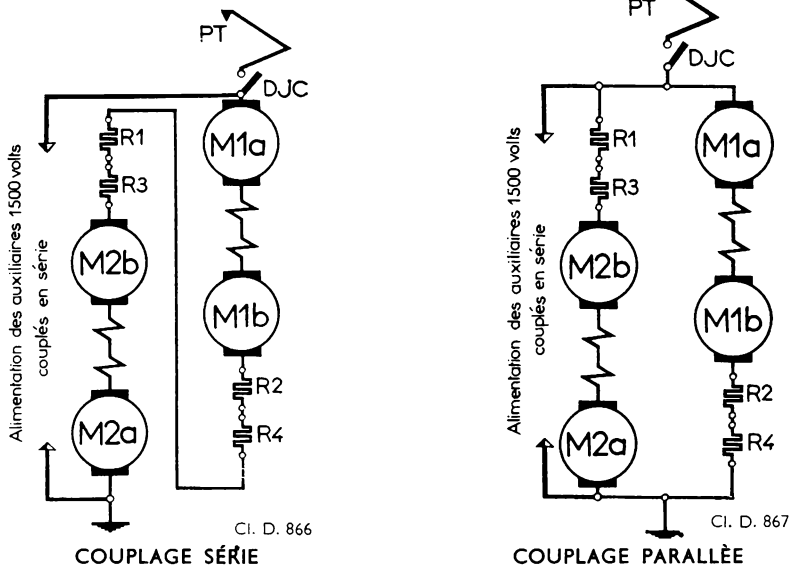


Fig. 48.

RM	Bloc redresseur principal.
SL	Inductance de lissage.
M1a-M1b	Moteur bogie 1.
M2a-M2b	Moteur bogie 2.
R1-R2-R3-R4	Rhéostats.
PT	Pantographe.
DJM	Disjoncteur monophasé.
HMC	Commutateur de toiture.
DJC	Disjoncteur continu.
TFP	Transformateur principal.
TFA	Transformateur auxiliaire.

(Documents Alsthom.)

de courant qu'elle délivre. A cet effet, un système de palpage, à base de relais ayant pour but de vérifier le choix du pantographe, est installé sur la machine.

1.36. — LOCOMOTIVES DIESEL ÉLECTRIQUES

Le moteur diesel de forte puissance se prête très mal à la traction : couple nul à vitesse nulle, variations de vitesse très réduites, rendement optimal au voisinage de sa vitesse et de sa puissance nominales seulement. L'attaque des roues par le moteur nécessiterait des dispositifs mécaniques très complexes : embrayages, boîte de vitesses, régulateur (1).

Il est beaucoup plus avantageux d'utiliser le moteur thermique pour entraîner un générateur de courant qui alimente à son tour des moteurs de traction classiques.

L'équipement d'une locomotive diesel-électrique comprend donc :

— *un ou deux moteurs diesels* ;

— *un générateur de courant* : dynamo ou alternateur ;

— *des moteurs de traction alimentés* directement ou à travers des redresseurs suivant le type de générateur.

1.361. Le problème de la régulation.

En régime normal, le moteur diesel fournit une puissance constante et le problème consiste à transmettre aux moteurs à vitesse variable cette puissance constante fournie à une vitesse constante.

La puissance appelée par les moteurs a pour valeur UI, et si l'on veut utiliser toute la puissance du moteur thermique, il faut que le produit UI soit constant. La caractéristique U(I) est donc une hyperbole équilatère, et elle correspond à la caractéristique en charge du générateur idéal qui transmettrait dans les meilleures conditions toute la puissance du moteur diesel aux moteurs électriques.

La puissance peut également s'exprimer par le produit Fv et la caractéristique idéale $F(v)$ se représente également par une hyperbole. Nous savons déjà que la caractéristique $F(v)$ reproduit à l'échelle près, la caractéristique $C(n)$ des moteurs et la courbe $C(n)$ doit donc être aussi une hyperbole.

---

(1) Des essais sont faits avec des transmissions hydrauliques sur des locomotives de ligne. Les autorails, de par la faible puissance mise en jeu, utilisent une transmission mécanique.

Considérons, par ailleurs, les courbes n(I) et C(I) du moteur série, et soit n, la valeur de la vitesse de rotation correspondant, en régime normal, à la vitesse imposée pour la locomotive. Cette vitesse peut être atteinte avec plusieurs valeurs de U et de I, soit U_1I_1, U_3I_3, U_2I_2, (*fig.* 49). Supposons maintenant le point de fonctionnement en M, (correspondant à une tension U_2 et une intensité I_M) et que la tension U_2 soit la seule disponible. Dans le cas d'une rampe, la vitesse aura tendance à diminuer et le point de fonctionnement va se déplacer en M′ où la puissance UI augmente. Dans le cas d'une descente, au contraire, le point

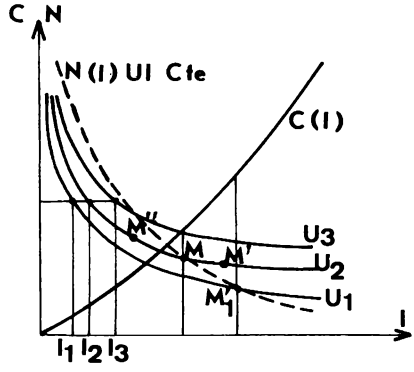


Fig. 49.

de fonctionnement se déplace en M″ et la puissance diminue du fait de la diminution de I. Le moteur diesel sera donc tantôt surchargé, tantôt déchargé. Pour qu'il fournisse une puissance constante, il faut que le produit UI reste constant, autrement dit que le point de fonctionnement, dans le cas d'une rampe, ne se déplace pas en M′, mais en M'_1 sur une autre caractéristique n (I) correspondant à une tension $U_1 < U_2$ et telle que $U_1I_{M'1} = U_2I_M$.

On peut également définir une courbe n(I) correspondant à une puissance constante. En remarquant que n est proportionnel à U, on voit que n(I) est aussi une hyperbole ; elle est représentée, en pointillé, sur la *figure* 49.

En définitive, une augmentation de l'effort de tirage doit se traduire par :

— une *diminution de la vitesse* ;

— une *augmentation de l'intensité* ;

— une *diminution de la tension* ;

dans des proportions telles que les produits UI, Fv, Cω, nI restent constants. Une diminution de l'effort de tirage doit évidemment s'accompagner de variations en sens inverse des mêmes paramètres. Toutes ces conditions sont respectées dans la mesure ou la caractéristique U(I) répond à la condition UI = Cte.

1.362. Génératrices à courant continu.

Les génératrices classiques (séparée, dérivation, série) sont loin de répondre à cette condition. Une première solution consisterait à utiliser une génératrice dont la caractéristique U(I) serait tangente à l'hyperbole UI = Cte, mais le moteur thermique ne serait utilisé à sa pleine puissance qu'au point de tangence.

En combinant judicieusement l'excitation séparée, l'excitation dérivation et l'excitation série soustractive, on arrive à obtenir des caractéristiques tombantes. Les *diagrammes* de la *figure* 50 indiquent les variations des caractéristiques sous l'influence des diverses excitations.

Les équipements de régulation chargés de l'adaptation de la caractéristique de la génératrice sont plus ou moins complexes suivant la puissance mise en jeu.

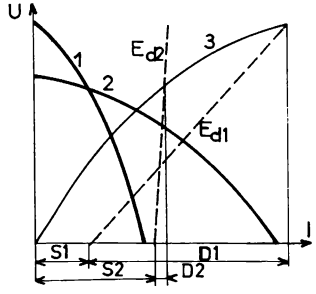


Fig. 50.

1. Courbe en charge correspondant à une excitation séparée S_1 et une excitation dérivation prédominante D_1.
2. Courbe en charge avec excitation séparée prédominante S_2 et excitation dérivation D_2.
3. Courbe à vide.

E_{d1}, E_{d2} : droites d'excitation.

◆ Autorégulation à caractéristique unique tangente ou sécante.

Les *diagrammes* 51 en indiquent le principe. Ce schéma est réservé aux machines de faible puissance pour lesquelles l'amélioration apportée par une meilleure régulation ne justifierait pas la complexité de l'appareillage. Au démarrage, au fur et à mesure que la vitesse du moteur diesel augmente, l'excitation séparée est également augmentée par un

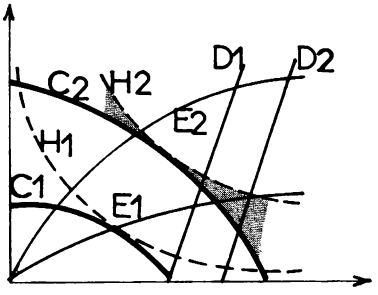
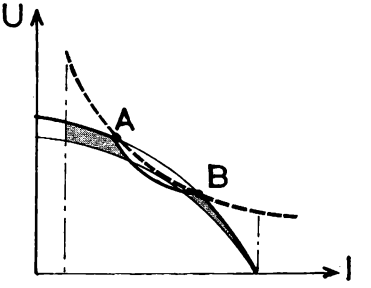


Fig. 51 *a.*

C_1, C_2. Caractéristiques en charge de la génératrice pour deux vitesses de rotation du moteur diesel.
D_1, D_2. Droites d'excitation.
E_1, E_2. Caractéristiques à vide.
H_1, H_2. Hyperboles de puissance constante du moteur diesel.

On voit que de part et d'autre du point de tangence, le moteur diesel travaille en dessous de sa puissance nominale.



(Documents C.E.M.)

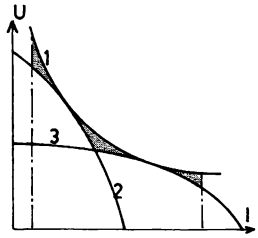
Fig. 51 *b.*

L'hyperbole de puissance constante ou lieu d'être tangente à la caractéristique en charge, la coupe en A et B. Les aires en grisé représentent le gain de puissance par rapport aux caractéristiques tangentes, mais le moteur est surchargé entre A et B, la diminution de vitesse qui en résulte a pour effet d'incurver vers le bas la caractéristique en charge de la génératrice.

rhéostat. A chaque vitesse du moteur diesel, correspondent une hyperbole de puissance, une caractéristique à vide et une caractéristique en charge de la génératrice. On arrive ainsi à obtenir une série de caractéristiques en charge qui sont à peu près tangentes à l'hyperbole du moteur. En marche normale le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique correspondant à la vitesse nominale du moteur diesel. Ce système est très simple, mais la puissance du moteur diesel n'est pas utilisée au mieux.

◆ **Autorégulation à deux caractéristiques.**

Le principe consiste à utiliser, en régime normal, deux caractéristiques différentes obtenues en modifiant les taux d'excitation séparée et dérivation en fonction de la tension aux bornes de la génératrice. Aux faibles vitesses, et pendant la période de démarrage, on utilise l'excitation séparée prédominante et à partir d'une certaine vitesse des moteurs de traction, on augmente l'excitation dérivation, tout en réduisant l'excitation séparée. La *figure* 52 donne le



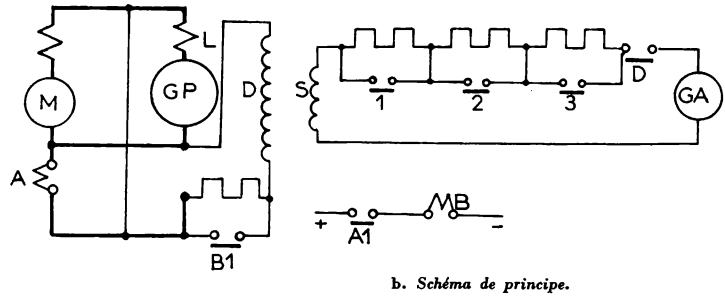
a.

a. *Caractéristiques.*

1. Caractéristique hyperbolique à puissance constante.
2. Caractéristique de la génératrice avec excitation dérivation prédominante.
3. Caractéristique de la génératrice avec excitation séparée prédominante.

Les aires en grisé représentent la perte de puissance par rapport à la caractéristique idéale.

(*Document C.E.M.*)



b. *Schéma de principe.*

GP. Génératrice principale.
GA. Génératrice auxiliaire fournissant le courant d'excitation séparé.
M. Moteur de traction.
D. Excitation dérivation.
S. Excitation séparée.
L. Excitation série, utilisée pour le lancement du moteur diesel.

Les contacteurs 1, 2, 3, D sont sous la dépendance de la vitesse du moteur diesel pendant la période de démarrage.
A. Relais de tension soumis à la tension de GP.
B. Relais sous la dépendance de A, permettant de modifier la caractéristique en charge.

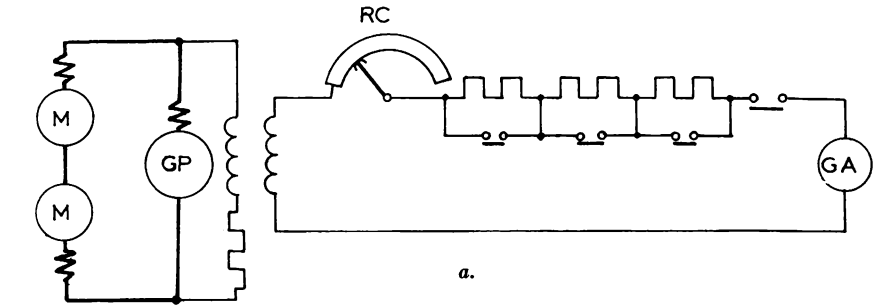
(*Document C.E.M.*)

Fig. 52.

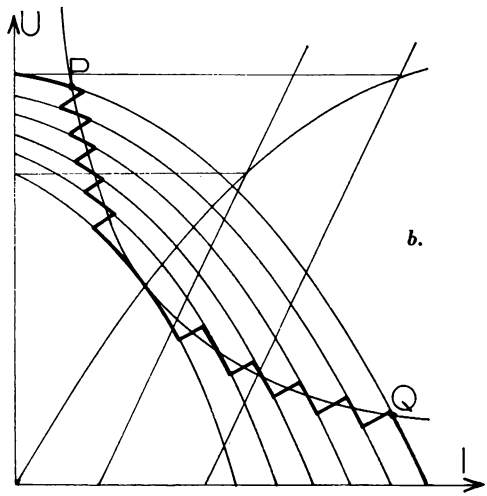
schéma du circuit de puissance d'un tel équipement. Le démarrage est obtenu en faisant varier progressivement la vitesse du diesel et l'excitation séparée de la génératrice.

◆ **Régulation asservie à la puissance du moteur diesel.**

La *figure* 53 en illustre le principe. La caractéristique U(I), à excitation maximale, coupe l'hyperbole du moteur diesel aux points P, correspondant à la vitesse maximale des moteurs de traction, et Q, situé au voisinage de l'intensité maximale des moteurs. Pour éviter que le moteur diesel soit surchargé entre ces deux points, un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation séparée,



a.



b.

Fig. 53.

a. Schéma de l'équipement.

Par rapport à l'équipement de la *figure* 52, on note la suppression des relais A et B, l'excitation dérivation étant maintenue constante et l'adjonction d'un rhéostat RC sur l'excitation séparée asservi à la puissance du moteur diesel.

(Document C.E.M.)

b. Caractéristiques de l'équipement.

Afin de ne pas surcharger le dessin seules les droites d'excitation correspondant aux caractéristiques extrêmes ont été représentées.

(Document C.E.M.)

permet de définir des caractéristiques en charge U(I) situées au-dessous de la courbe passant par P et Q. Ce rhéostat est asservi au régulateur du moteur diesel de façon à entrer en action au moment où le diesel commence à être, soit

surchargé, soit déchargé. Le régulateur du diesel attaque un tiroir de distribution chargé d'admettre de l'huile sous pression d'un côté ou de l'autre d'un piston solidaire mécaniquement du rhéostat.

Le démarrage de la locomotive s'effectue d'abord par accélération du moteur diesel, puis à partir d'une certaine vitesse de rotation du diesel, par accélération et intervention du rhéostat de régulation. Au régime nominal, le rhéostat intervient en combinaison avec le shuntage des inducteurs des moteurs sous l'effet de relais centrifuges.

1.363. Génératrices à courant alternatif

L'alternateur utilisé est du type triphasé et le courant est redressé par des diodes au silicium. L'équipement des moteurs est tout à fait semblable à celui utilisé dans les locomotives à génératrice continue.

L'excitation de l'alternateur est fournie par une excitatrice séparée ; la forme naturellement tombante de la caractéristique U(I) de l'alternateur, due à sa grande réactance interne, permet de relier directement l'induit de l'excitatrice aux inducteurs de l'alternateur. L'appareillage de régulation est disposé sur l'excitatrice. Les *figures* 54 et 55 indiquent les schémas de principe des circuits de puissance et de contrôle d'une locomotive utilisant un moteur diesel.

Lorsque la puissance de la locomotive devient importante, supérieure à 3 000 kW par exemple, un seul moteur diesel devient insuffisant. Une solution consiste alors à entraîner un seul alternateur par deux moteurs diesel. Un des

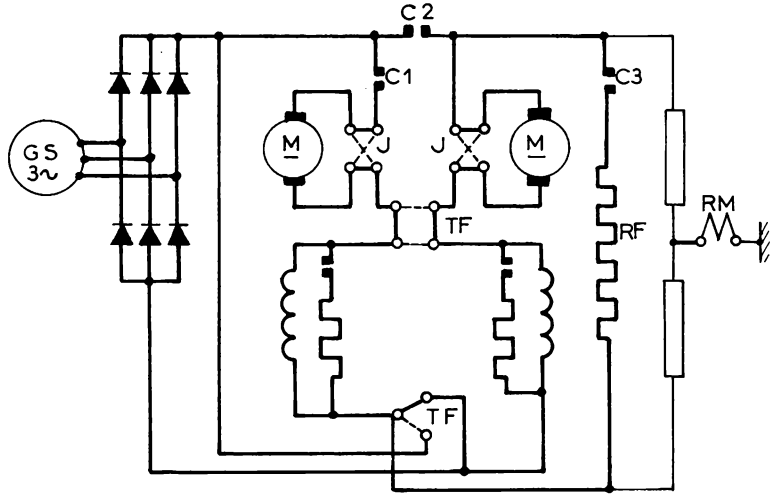


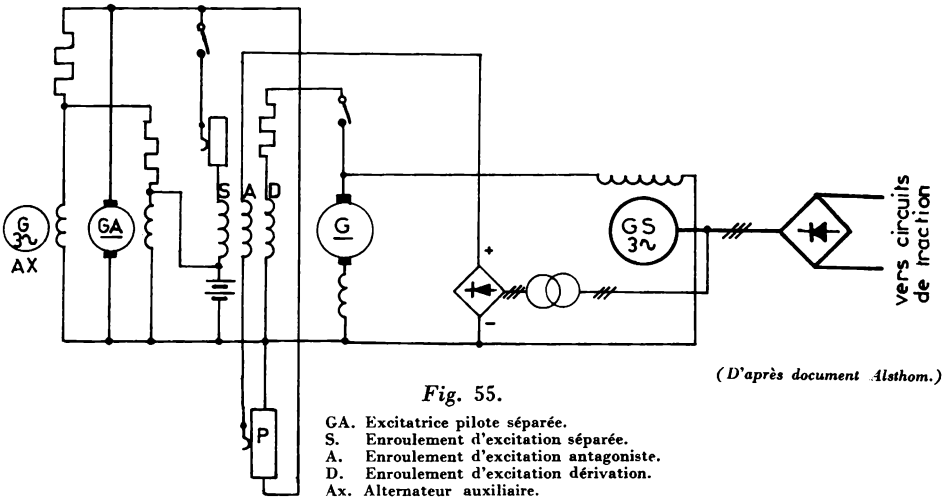
Fig. 54.

C_1. Contacteur fermé en position traction et en position freinage.
C_2. Contacteur fermé en traction.
C_3. Contacteur fermé en freinage.
TF. Commutateurs traction-freinage. (Les pointillés représentent les connexions en freinage.)
RF. Résistance de freinage.
RM. Relais de masse.
J. Inverseurs de marche.
En position traction, les deux moteurs sont montés en parallèle ; en position freinage, les inducteurs montés en série sont excités séparément ; les induits en série débitent sur RF.

(D'après document Alsthom.)

moteurs entraîne le rotor dans un sens, l'autre moteur entraîne en sens inverse le stator. La *figure* 56 montre la disposition d'un tel alternateur.

La fréquence des alternateurs est choisie assez élevée (aux environs de 150 Hz), ce qui permet de diminuer leur encombrement.



(D'après document Alsthom.)

Fig. 55.

GA. Excitatrice pilote séparée.
S. Enroulement d'excitation séparée.
A. Enroulement d'excitation antagoniste.
D. Enroulement d'excitation dérivation.
Ax. Alternateur auxiliaire.

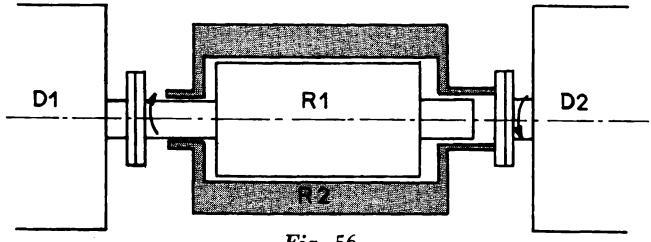


Fig. 56.

D_1, D_2. Moteurs diesel.
R_1. Rotor entraîné par D_1 et ayant un rôle d'inducteur.
R_2. Rotor entraîné par D_2 et ayant un rôle d'induit.

Par rapport à la génératrice à courant continu, l'alternateur présente l'avantage d'un poids et d'un encombrement moindres, à puissance égale. A titre d'exemple, sur les locomotives BB 67 000, le remplacement de la dynamo par un alternateur a permis un gain en poids de 12 % et un gain de puissance de 50 %.

Avec les derniers modèles de moteurs diesel développant une puissance de 3 300 kW, il est maintenant possible de construire, suivant la technique de l'alternateur birotor, des locomotives diesel d'une puissance de l'ordre de 6 000 kW, donc comparables du point de vue puissance aux locomotives électriques les plus puissantes.

1.37. — FREINAGE ÉLECTRIQUE DES LOCOMOTIVES

Le principe du freinage électrique consiste à utiliser les moteurs de traction en génératrices et à les faire débiter :

— *sur des résistances*, dans le freinage dit rhéostatique ;

— *sur la ligne de contact*, dans le freinage par récupération.

D'un autre point de vue, on peut utiliser les moteurs en freinage de maintien, c'est-à-dire pour retenir un train dans une descente sans appliquer les freins mécaniques, ou en vue d'obtenir l'arrêt ou un ralentissement notable du train.

1.371. Freinage des locomotives à courant continu.

◆ **Freinage rhéostatique.**

L'inversion du couple exige l'inversion du courant dans l'induit et l'amorçage en génératrice auto-excitée ne peut se concevoir que dans la mesure où le magnétisme rémanent n'est pas détruit. Si on envisage l'utilisation des moteurs en génératrices à excitation série, il est nécessaire d'inverser les connexions des inducteurs.

Le couplage en série de plusieurs génératrices à excitation série ne demande aucune précaution spéciale. En revanche pour remédier à l'instabilité du couplage en parallèle, il y a lieu de croiser les inducteurs.

Il est aussi possible d'utiliser une excitation séparée. Dans ce cas, le couple de freinage est réglé soit par action sur la résistance de débit, soit sur le courant d'excitation.

Dans tous les cas, le couple de freinage est limité par l'intensité débitée et, compte tenu du rendement des moteurs, il est légèrement supérieur au couple moteur obtenu dans le fonctionnement normal. Les *figures* 57, 58 et 59 indiquent les schémas utilisés et les caractéristiques de freinage obtenues.

Indiquons également que les résistances du rhéostat de démarrage sont utilisées pour le freinage et que l'équipement de freinage d'une locomotive à courant continu complique peu l'équipement général. L'intérêt du freinage électrique rhéostatique réside dans l'économie réalisée sur l'usure des sabots et des bandages de la locomotive et dans la souplesse de conduite.

◆ **Freinage par récupération.**

Il n'est possible, en courant continu, que si la sous station est réversible (commutatrice, redresseurs pouvant fonctionner en onduleurs) ou si d'autres locomotives se trouvent sur le même tronçon de ligne.

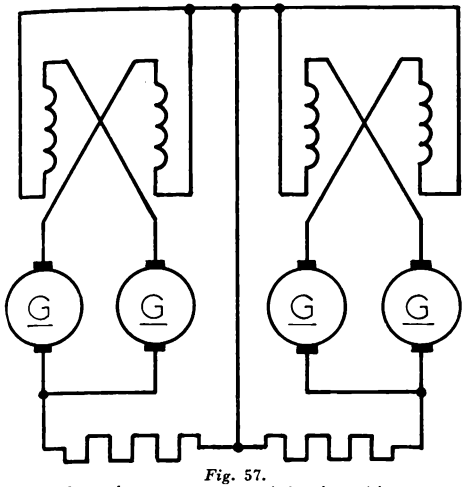


Fig. 57.
Couplage des moteurs en génératrice série pour freinage rhéostatique.

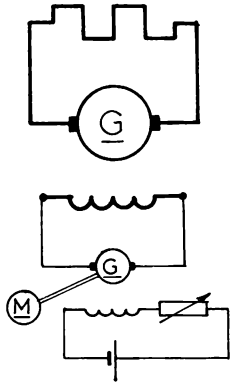


Fig. 58 *a.*
Principe de couplage à excitation séparée par excitatrice.

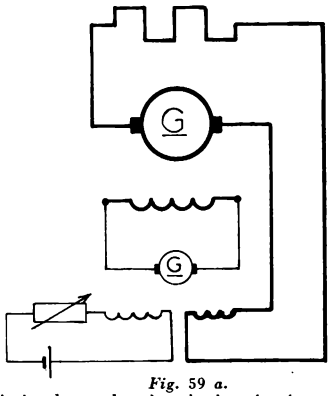


Fig. 59 *a.*
Principe du couplage à excitation séparée avec enroulement série soustractif sur l'excitatrice.

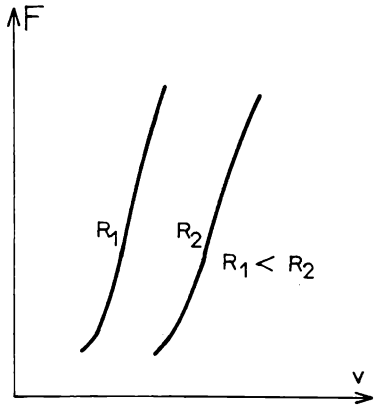


Fig. 57 *a.*
Courbes de freinage en génératrices série.
R_1 - R_2 résistances de débit.

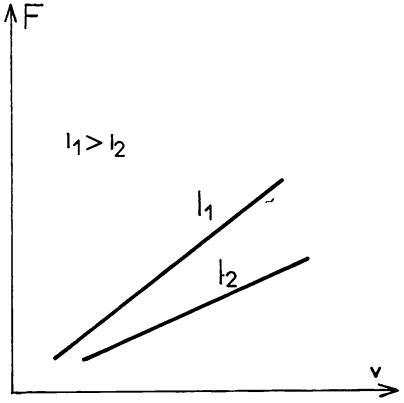


Fig. 58 *b.*
Courbes de freinage obtenues avec une excitation séparée I_1 - I_2 courant d'excitation.

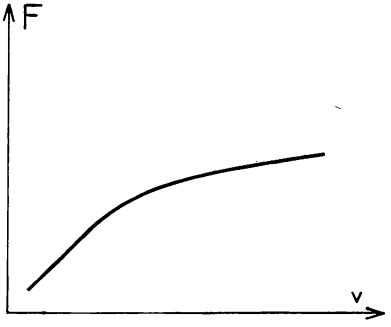


Fig. 59 *b.*
Courbe de freinage avec enroulement série soustractif.

La tension délivrée par les moteurs fonctionnant en génératrices doit être supérieure à la tension de la caténaire. La f.é.m. est proportionnelle à la vitesse et au flux. Le flux étant limité par les phénomènes de saturation et d'échauffement des inducteurs, il existe donc une vitesse au-dessous de laquelle la récupération n'est plus possible. Le recours au couplage série des différents moteurs permet d'abaisser cette vitesse, mais le freinage par récupération n'est pas possible jusqu'à l'arrêt du train.

L'excitation série des génératrices entraîne des caractéristiques de freinage instables ; en effet, on voit sur la *figure* 60 que toute augmentation de vitesse se traduit par une diminution du couple de freinage, alors qu'une diminution de vitesse entraîne une augmentation du couple de freinage, donc une augmentation de l'intensité débitée pouvant amener la disjonction de l'appareillage de protection.

La tension de la caténaire peut varier brusquement et il s'en suit des variations brutales de freinage. Pour éviter cet inconvénient, il est nécessaire de stabiliser le courant débité.

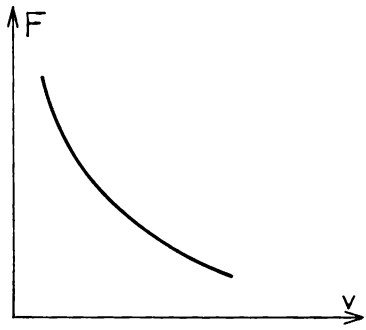


Fig. 60.

Caractéristique de freinage d'une génératrice série en récupération.

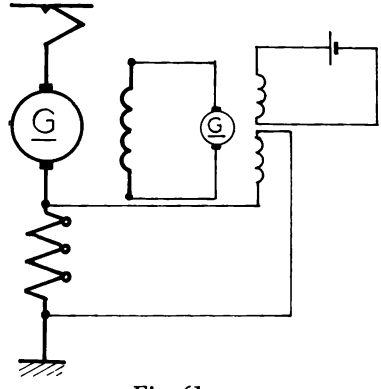


Fig. 61.

En pratique on utilise les schémas suivants :

— *Excitation séparée* fournie par une excitatrice à excitation composée (*fig.* 60). L'*excitation série* est à flux soustractif et le courant est prélevé aux bornes d'un shunt inductif placé dans le circuit de la génératrice principale. Il en résulte que toute variation de l'intensité récupérée entraîne une variation en sens inverse de la tension d'excitation et, par suite, du courant d'excitation de la génératrice principale.

- *Excitation séparée avec résistance de stabilisation.* La tension aux bornes de R s'oppose à la tension de l'excitatrice (*fig.* 62). Toute variation du courant de récupération entraîne une variation en sens inverse du courant d'excitation.

— *Excitation séparée avec moteur de stabilisation.* Un moteur à excitation série, non saturé, est entraîné par le moteur de l'excitatrice. Sa vitesse est donc imposée et la f.c.é.m. qu'il oppose au courant récupéré est proportionnelle à ce courant suivant les relations :

$$E' = nN\Phi = KnNI$$

L'énergie mécanique du moteur est restituée à l'excitatrice.

Il est encore possible de monter simultanément une résistance et un moteur de stabilisation.

Dans tous les montages, l'effort de freinage varie en fonction de la vitesse, de l'intensité débitée par l'induit, de l'intensité d'excitation, suivant les diagrammes de la *figure* 63.

Le freinage par récupération, utilisé en freinage de maintien dans les longues descentes, permet une économie notable pouvant dépasser 10 à 15 %.

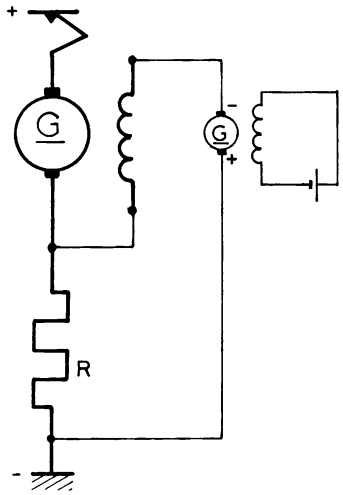


Fig. 62.

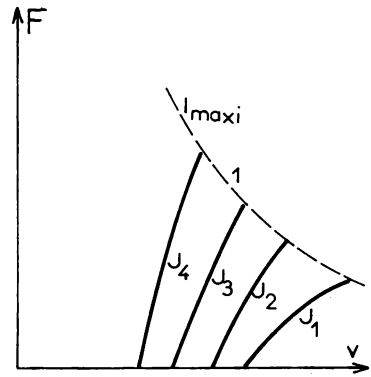


Fig. 63.

I. Courant débité par l'induit.
J. Courant d'excitation.
$J_4 > J_3 > J_2 > J_1$.
1. Courbe $I_{maxi} = f(v)$ indiquant les valeurs de I compatibles avec l'échauffement et une bonne commutation.

1.372. Freinage des locomotives monophasées à moteurs directs.

◆ **Freinage rhéostatique.**

Il ne diffère pas essentiellement du freinage sur les locomotives à courant continu. Les moteurs peuvent être utilisés :

— en *génératrices de courant continu*, excitées séparément par une excitatrice ;

— en *génératrices de courant alternatif*, excitées par une prise du transformateur.

Dans les deux cas, des modifications sont à apporter aux pôles de commutation. Si le moteur fonctionne en courant continu, seule la commutation continue doit être compensée. Dans le cas de l'excitation alternative, l'inversion de la f.é.m. de transformation oblige à prévoir une nouvelle répartition du courant d'excitation entre les pôles de commutation et le shunt résistant.

◆ **Freinage par récupération.**

Il y a lieu de noter quelques différences par rapport aux locomotives à courant continu :

— la *tension délivrée* par les moteurs peut être ajustée à celle de la caténaire par l'intermédiaire du graduateur de tension ;

— la *puissance récupérée* et le couple de freinage dépendent du produit UI cos φ et varient donc, pour une même intensité, proportionnellement au facteur de puissance.

La valeur maximale du courant est limitée par l'échauffement, et, pour obtenir le couple maximal de freinage, l'intensité doit être en phase avec la tension. Si l'on n'utilise aucun artifice, la tension U et l'intensité I se placent l'une par rapport à l'autre comme l'indique le diagramme 64, de sorte que l'on a :

$$\vec{E} = \vec{U} + \vec{rI} + \vec{L\omega I}$$

Pour remédier à cet inconvénient, on utilise l'un des moyens suivants :

— *Excitation par un courant de phase convenable.* Les pôles principaux excités par une prise du transformateur sont, du fait de leur forte réactance, parcourus par un courant pratiquement en quadrature avec la tension. La f.é.m. induite se trouve déphasée par rapport à la tension de la ligne. Un condensateur inséré dans le circuit des inducteurs permet de donner au courant d'excitation, et, par suite, à la f.é.m. induite, une phase telle que le vecteur U soit en phase ou de phase très voisine avec I. Le schéma pratique est indiqué sur la *figure* 65. On remarquera la présence d'un transformateur abaisseur qui évite au condensateur d'être traversé par le courant important des inducteurs. La résistance R permet de régler le courant d'excitation. Les courbes de freinage sont représentées sur la *figure* 66.

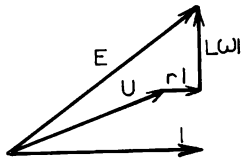


Fig. 64

On remarquera la pente importante des caractéristiques, ce qui rend la conduite assez délicate.
J. Courant d'excitation.
$J_3 > J_2 > J_1$.

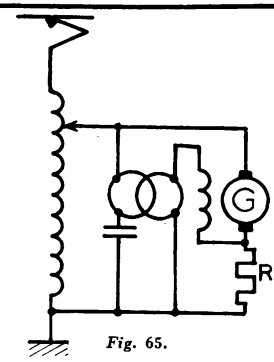


Fig. 65.

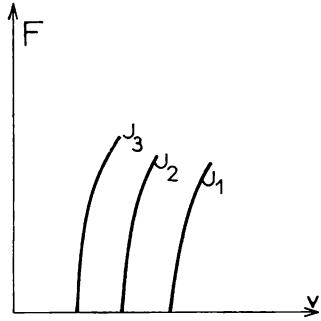


Fig. 66.

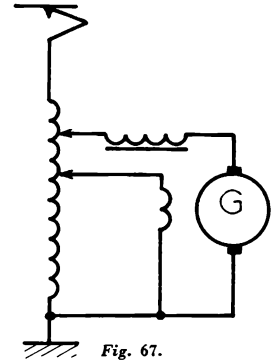


Fig. 67.

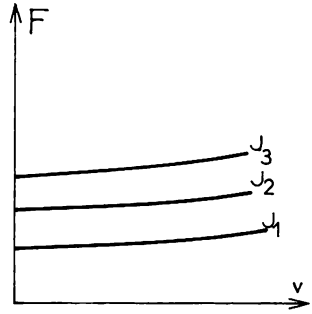


Fig. 68.

J courant d'excitation.
$J_3 > J_2 > J_1$. Remarquer que le freinage se maintient jusqu'à l'arrêt.

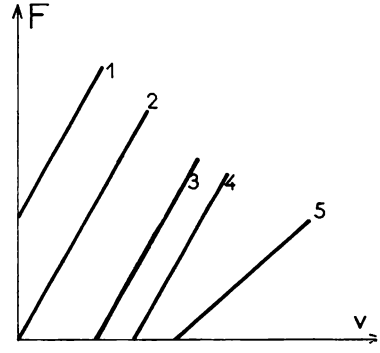


Fig. 69.

1. Retard à l'allumage $\theta_1 > 90°$.
2. Retard à l'allumage $\theta_2 = 90°$.
3. Retard à l'allumage $\theta_3 < 90°$.
   Courant d'excitation J_1 constant.
   Nombre de spires du primaire N_1 constant.
4. $N'_1 > N_1$.
5. N'_1 spires au transformateur, courant d'excitation $J_2 < J_1$.

— *Insertion d'une réactance dans le circuit d'induit.* Les pôles principaux sont excités par une prise du transformateur et leur courant est déphasé de 90° (*fig.* 67). La f.é.m. induite est déphasée par rapport à U d'un angle important et la différence E — U est telle qu'elle provoquerait le passage d'un courant trop élevé. Pour limiter l'intensité débitée, on insère entre l'induit et la ligne une forte réactance qui a pour effet de modifier la phase de I de telle sorte que :

$$\vec{E} = \vec{U} + L\omega\vec{I} + r\vec{I} \text{ (négligeable)}$$

Les caractéristiques de freinage, presque horizontales, ont l'allure indiquée sur la *figure* 68.

Des systèmes plus complexes permettent de réduire le déphasage entre E et U. A cet effet, un moteur excité directement par le transformateur débite sur la ligne, à travers les inducteurs d'un ou de deux autres moteurs dont les induits sont connectés à la ligne suivant le premier schéma.

1.373. Freinage des locomotives à redresseurs.

Le freinage rhéostatique est utilisable comme sur les autres types de locomotives à condition de prévoir des résistances de débit.

Le freinage par récupération n'est possible que si la machine est munie de redresseurs contrôlés. Alors que ce type de freinage n'était concevable en courant continu que dans la mesure ou la tension de la génératrice était supérieure à la tension de ligne, il est possible de récupérer, sur une machine à redresseurs, dans une zone de vitesses beaucoup plus étendue, en faisant varier le rapport de transformation du transformateur.

Nous supposerons connu le principe de fonctionnement de l'onduleur (1) et nous rappellerons simplement les opérations essentielles de réglage :

— l'*excitation série des moteurs* conduit à une instabilité mécanique et il est nécessaire de la remplacer par une excitation composée (séparée et série) ;

— la *polarité des moteurs* doit être inversée pour que les redresseurs puissent fonctionner en onduleurs. On y arrive en jouant sur le sens du courant d'excitation ;

— le *couple de freinage* peut être réglé, soit par action sur le courant d'excitation, soit par action sur le retard à l'allumage, soit sur la tension alternative au secondaire du transformateur.

Les caractéristiques de freinage ont l'allure représentée sur la *figure* 69. On remarquera que l'augmentation du retard à l'allumage permet de réaliser le freinage jusqu'à l'arrêt.

(1) Voir *Electronique*, M. Mounic. Foucher, éditeur.

Le freinage par récupération présente cependant quelques inconvénients :

— le *facteur de puissance* devient faible si l'angle de retard à l'allumage est voisin de 90° ;

— le *retard à l'allumage* ne doit pas être voisin de 180°, sous peine de voir la commutation perturbée et de faire apparaître des phénomènes de reconduction. Dans ces conditions, le redresseur, devant être bloqué, se rallume et continue à laisser passer le courant ; il s'en suit un véritable court-circuit pour le moteur dont la tension s'ajoute à celle du transformateur (*fig.* 70) ;

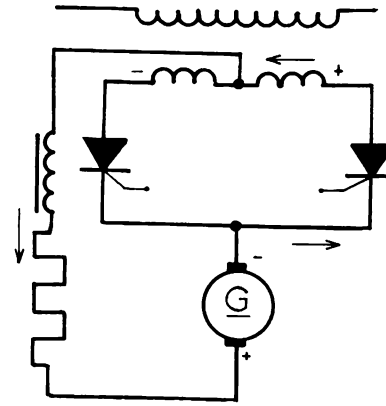


Fig. 70.
Les flèches indiquent le sens de passage du courant (électrons) lorsque le redresseur de droite, qui devrait être bloqué pour les polarités indiquées sur le transformateur, se rallume ou reconduit. En fonctionnement normal, c'est le redresseur gauche, qui, avec les polarités indiquées sur le transformateur, devrait laisser passer les électrons issus de G.

— les *ratés d'allumage* conduisent aux mêmes conséquences que la reconduction, l'anode qui doit s'éteindre continuant à débiter ;

— le *fonctionnement de l'onduleur* non autonome ne peut se concevoir que si la fréquence est imposée par la ligne. En cas de décollement du pantographe, le moteur débite en court-circuit sur le secondaire du transformateur dont la résistance, en courant continu, est évidemment très faible.

1.38. — CAPTAGE DU COURANT

L'alimentation de la locomotive en énergie se fait par l'intermédiaire d'un dispositif à polygones déformables appelé pantographe. La captation correcte du courant exige les conditions suivantes :

— *pression constante sur le fil*, malgré les variations d'altitude de la caténaire ;

— *insensibilité nulle* ou très réduite au vent ;

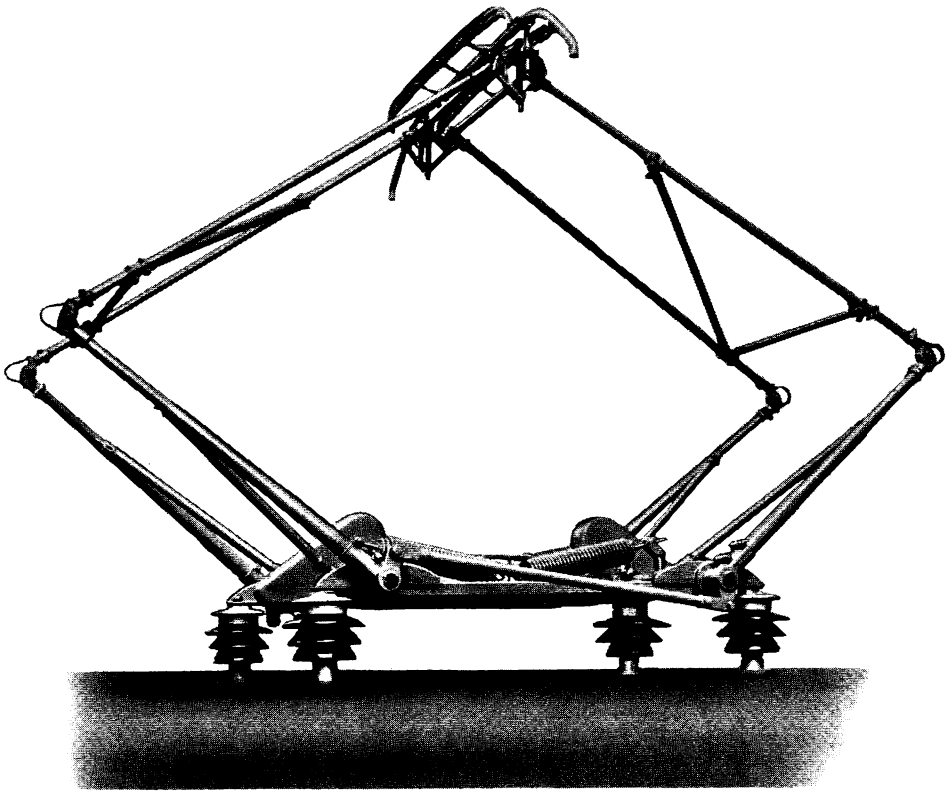
— *insensibilité aussi réduite que possible* au givre ;

— *usure réduite.*

Ces conditions sont de plus en plus difficiles à assurer au fur et à mesure qu'augmente la vitesse.

1.381. Pantographe à double pentagone.

Dans sa version classique, il se présente sous la forme des *figures* 71 et 72. Il assure un fonctionnement correct jusque vers 140 à 150 km/h et l'intensité admissible est de l'ordre de 2 000 à 3 000 A. Il est utilisé en courant continu.



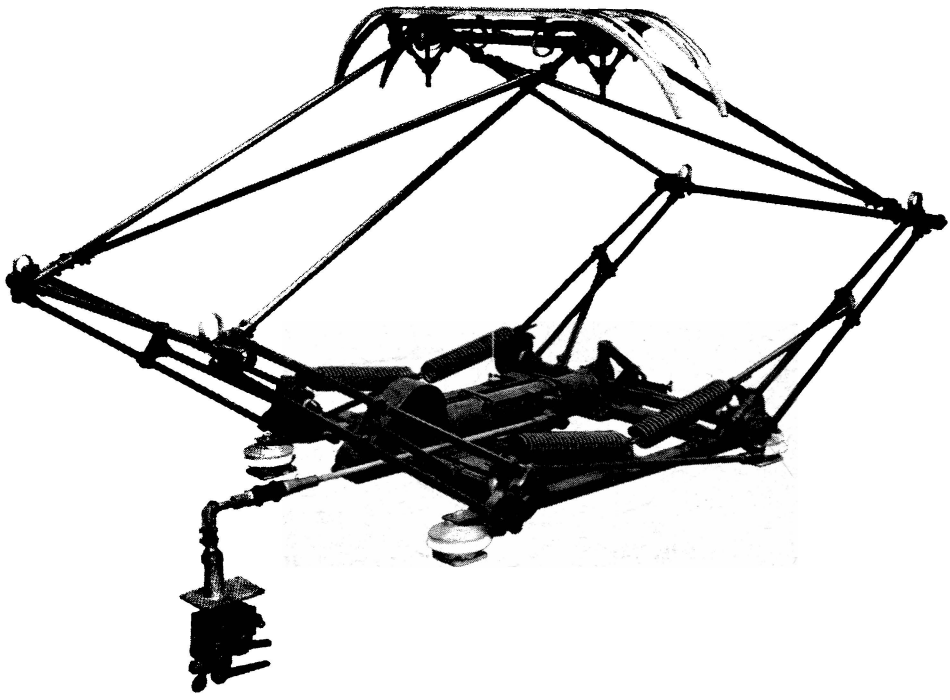
(Document Faiveley.)

Fig. 71. — Pantographe type « M » équipant les machines 12000-13000 et 14000.

Il existe des versions différentes avec bras inférieurs croisés.

Par suite des liaisons rigides entre les polygones, ceux-ci doivent être de construction rigoureusement identique. La cinématique du pantographe est très simple ; les articulations latérales décrivent des circonférences, tandis que l'archet se déplace suivant une verticale.

On reproche à ce système une masse importante et des articulations trop nombreuses, ce qui a pour effet de lui conférer une grande inertie et oblige à prévoir des efforts trop variables pour la manœuvre.



(Photo Faiveley.)

Fig. 72. — Pantographe type « G » équipant les machines à courant continu construites antérieurement à l'année 1957.

1.382. Pantographe à quadrilatère unique (ou en V).

Le principe en est illustré par la *figure* 73. La trajectoire de la tête comporte une partie sensiblement verticale qui définit la zone d'utilisation.

Afin de maintenir l'archet dans une position convenable, les réalisations pratiques comportent un deuxième quadrilatère qui oblige l'archet à se déplacer dans des plans parallèles (*fig.* 73 *a*).

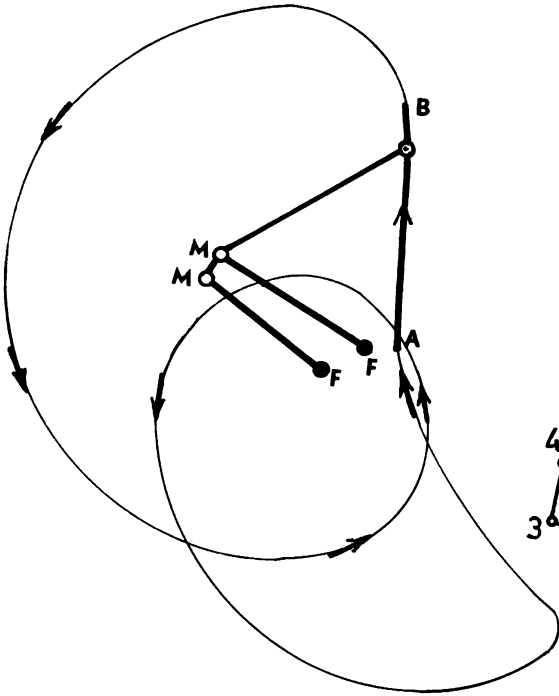


Fig. 73.

F. Articulations fixes.
M. Articulations mobiles.
AB. Zone d'utilisation du pantographe.

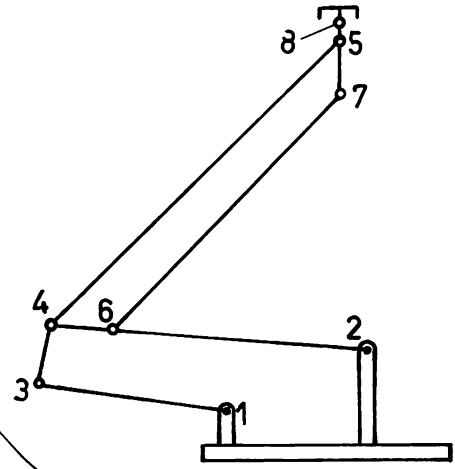


Fig. 73 *a*.

1-2. Articulations fixes.
2-4. Bielle principale.
5-7. Bielle supportant l'archet.
8. Articulation de l'archet.
3, 4, 5, 6, 7, 8. Articulations mobiles.

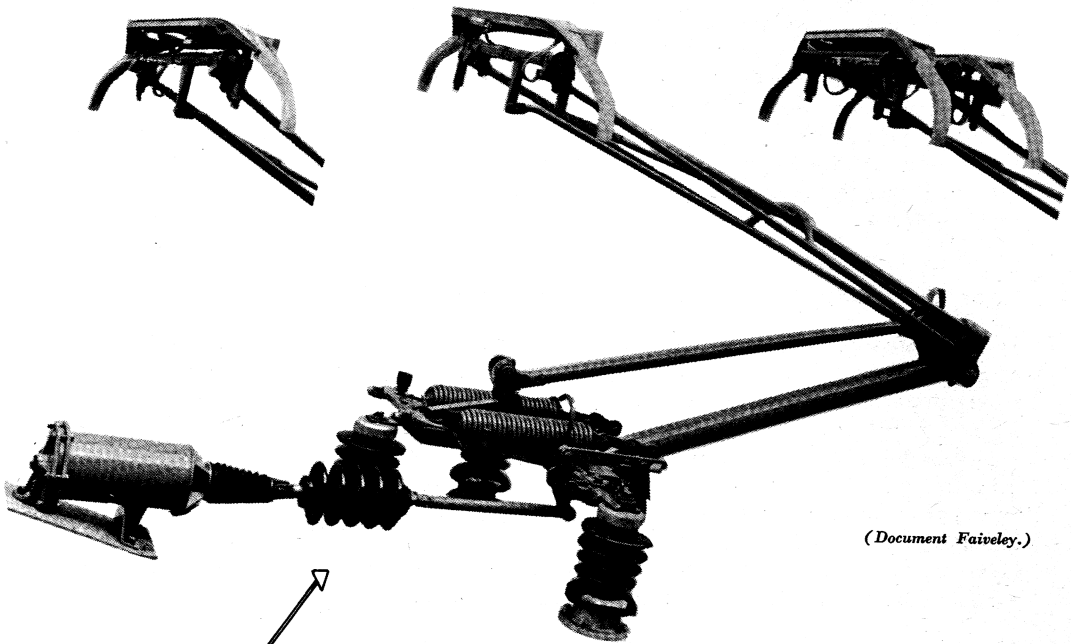
Par rapport au pantographe double, on note les avantages suivants :

— *suppression des liaisons mécaniques surabondantes* ;
— *plus grande légèreté et moindre inertie* ;
— *frottements réduits* ;
— *soulèvement moindre de la caténaire.*

Ce type d'archet est utilisé en courant alternatif et sur les engins polycourants. Il n'est pas sensible au sens du mouvement et peut donc s'utiliser indifféremment avec la pointe en avant ou en arrière.

Pour les vitesses supérieures à 180 km/h, l'effet aérodynamique entraîne une variation de la pression de l'archet en fonction de la vitesse. Pour remédier

à cet inconvénient, on fait varier l'effort de contact sur la caténaire par l'intermédiaire d'un vérin pneumatique. La pression interne dans ce vérin est asservie à la vitesse de la locomotive (*fig.* 74).



(Document Faiveley.)

Fig. 73 *b.* — Pantographe « AM 18 » équipant les machines bicourant 25100-25200-25500 et également les 40000.

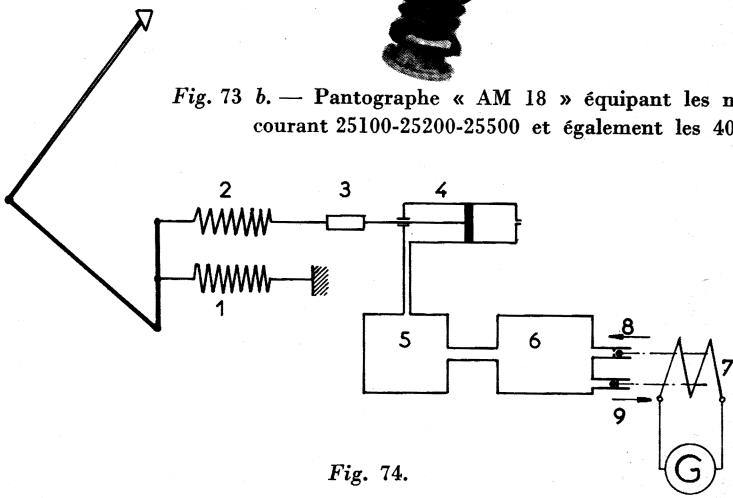


Fig. 74.

1. Ressort équilibrant le poids du pantographe et assurant une pression constante.
2. Ressort fournissant une pression variable.
3. Isolateur.
4. Vérin pneumatique.
5, 6. Réservoirs d'air comprimé.
7. Elément moteur agissant sur 8 et 9.
8. Admission d'air comprimé.
9. Echappement.

G. Détecteur tachymétrique fournissant une tension proportionnelle à la vitesse.

(D'après documents Faiveley).

1.39. — INFLUENCE DE L'ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE SUR L'ADHÉRENCE

Nous avons déjà signalé l'importance du phénomène d'adhérence, et plus particulièrement au moment du démarrage. Nous pouvons rappeler que, pour un état donné de la voie et un poids donné de la locomotive, l'adhérence est améliorée par l'absence de cabrage des bogies et de la caisse et par la liaison mécanique entre essieux. Ces facteurs font intervenir les dispositions de construction mécanique et nous avons déjà indiqué quelques solutions : traction basse, empattement important entre bogies, bogie monomoteur. Nous allons montrer que les caractéristiques électriques de la locomotive ont également une influence.

1.391. Influence de la pente des caractéristiques C (n).

Lorsque le coefficient d'adhérence diminue, il y a naissance d'un mouvement de glissement de la roue par rapport au rail et le mouvement est régi par les lois du frottement. Or, le coefficient de frottement, après la mise en mouvement, peut tomber à une valeur très faible, de l'ordre du dixième du coefficient d'adhérence.

Considérons la caractéristique C_m (n) d'un essieu moteur (*fig.* 75). On peut lui faire correspondre une caractéristique C_r (n) traduisant les variations de couple nécessaires pour faire tourner les roues en glissement sur le rail, sans qu'il y ait avancement de l'essieu. On sait que le coefficient de frottement est plus élevé au début du mouvement et il en résulte que la caractéristique C_r (n) a une pente négative, du moins au début du mouvement.

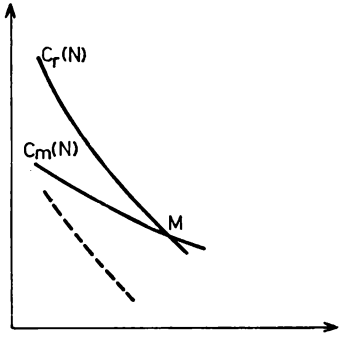


Fig. 75.

Examinons l'ensemble des deux courbes. Si elles se situent l'une par rapport à l'autre (comme sur la *figure* 75), le point de fonctionnement, en période de roulement normal, est situé à gauche de M, sur la partie de C_m (n) située au dessous de C_r (n). A la suite d'une cause quelconque (rail humide, feuilles, déchargement d'essieu), la courbe C_r (n) peut subir une translation verticale vers le bas et il y a amorçage d'un mouvement de glissement si cette translation amène C_r (n)

au-dessous du point de fonctionnement M. Ce glissement se maintient et dégénère en patinage, tant que la cause se maintient, puisqu'à toute augmentation de n, correspond une augmentation de l'excès du couple moteur sur le couple résistant. Même si la cause qui a provoqué le patinage disparaît, celui-ci peut persister si le nouveau point de fonctionnement se situe à droite du point M.

Si, au contraire, les caractéristiques C_m (n) et C_r (n) se situent l'une par rapport à l'autre (comme sur la *figure* 76) on voit qu'un glissement provoqué par une baisse de la caractéristique C_r (n) est limité au point M correspondant à l'intersection des deux caractéristiques. Lorsque la cause de glissement disparaît, l'essieu ralentit et se raccroche au rail. On voit donc tout l'intérêt de caractéristiques aussi tombantes que possible. On comprend aussi que la présence du rhéostat de démarrage, ayant pour effet de coucher les caractéristiques, aggrave le patinage s'il se produit au début du démarrage.

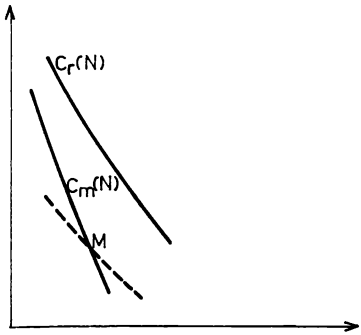


Fig. 76.

Les considérations précédentes concernent un moteur isolé. Il faut tenir compte également de l'influence que peuvent avoir les autres moteurs sur un moteur qui glisse.

1.392. Cas des moteurs couplés en série.

En fonctionnement normal, la tension se partage identiquement entre les deux moteurs, l'intensité est la même dans chacun des moteurs et ils fournissent chacun le même couple à la même vitesse. Soit M, le point de fonctionnement de chacun des moteurs (*fig.* 77). Si l'un des moteurs se met à patiner, sa vitesse de rotation croît, ainsi que sa f.c.é.m. La tension ne se partage plus identiquement entre les deux moteurs. Le moteur en patinage est soumis à une tension plus forte que la tension normale et le moteur qui ne patine pas voit diminuer la tension à ses bornes. Par ailleurs l'intensité diminue (cf. caractéristique n(I) du moteur série), ce qui entraîne une diminution du couple moteur. On peut supposer que la vitesse de rotation du moteur

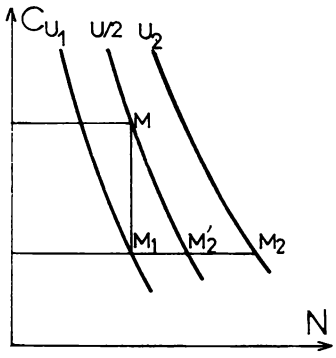


Fig. 77.

M_1, Point de fonctionnement du moteur 1 après patinage du moteur 2.

M_2, Point de fonctionnement du moteur qui patine.

M'_2, Point de fonctionnement du moteur 2 en patinage s'il était alimenté individuellement.

qui ne patine pas reste sensiblement constante, au début de la période de patinage ; en effet, sa vitesse est liée à la vitesse d'avancement de la locomotive dont l'énergie cinétique s'oppose au ralentissement. Dans ces conditions le point de fonctionnement du moteur qui ne patine pas est imposé par sa vitesse, et il se situe sur une nouvelle caractéristique C (n) correspondant à une tension plus faible que la tension U/2 ; le couple (égal pour les deux moteurs) va imposer au moteur qui patine une vitesse supérieure à celle qu'il aurait prise s'il était isolé et alimenté sous la tension U/2. Ainsi, le patinage d'un moteur est aggravé dans le cas de moteurs couplés en série.

On comprend alors que des locomotives ayant, au régime normal, les mêmes caractéristiques, mais dotées d'équipements électriques différents, n'aient pas le même comportement en cas de patinage, ni les mêmes capacités de démarrage. D'après les deux critères examinés, il est déjà possible d'établir une classification des différentes locomotives. Dans l'ordre décroissant de leurs qualités, du seul point de vue de l'adhérence, on trouvera :

— *les locomotives à moteurs constamment couplés en parallèle, à démarrage sous tension progressive, sans rhéostat* (locomotives à redresseurs) ;

— *les locomotives à courant continu* 1 500 *V, à moteurs fonctionnant au régime normal en couplage parallèle* ;

— *les locomotives à courant continu* 3 000 *V, fonctionnant au régime normal avec des moteurs couplés par deux en série* ;

— *les locomotives à courant alternatif à moteurs directs* (1).

Par ailleurs, la conception du rhéostat de démarrage a son influence. C'est ainsi que dans le cas de moteurs couplés en parallèle, ou série-parallèle, il est préférable de disposer une résistance commune pour tous les moteurs, plutôt qu'une résistance par moteur. La chute de tension dans la résistance commune ne dépend pas seulement de l'intensité absorbée par le moteur qui patine, mais de l'intensité totale absorbée par l'ensemble des moteurs. La finesse du rhéostat a également son importance ; des variations d'effort aussi faibles que possible constituent un élément favorable.

1.393. Lutte contre le patinage.

Nous venons de voir que le patinage présente des dangers pour les moteurs, et qu'il compromet le démarrage. Pour remédier à ces inconvénients, on cherche,

(1) La chute de tension inductive, dans les moteurs directs a pour effet de coucher les caractéristiques C(n).

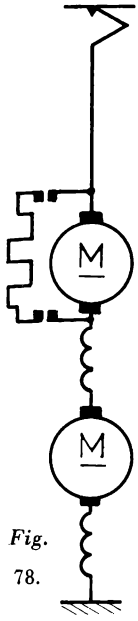


Fig. 78.

dès qu'il se manifeste, à le limiter par différents moyens : régression sur un cran inférieur du rhéostat de démarrage, sablage. Une solution électrique consiste, après décèlement du patinage par des relais sensibles à l'accélération des essieux, à réduire le couple du moteur qui patine. A cet effet, l'induit est shunté par une résistance (*fig.* 78). L'intensité totale, dans le cas de moteurs en série, varie peu, puisqu'elle est la somme de l'intensité dans l'induit et dans la résistance. Le couple des autres moteurs reste constant, tandis que le moteur shunté voit son couple diminuer.

1.394. Cas des locomotives diesel électriques.

Nous avons déjà signalé que l'utilisation de la puissance du moteur diesel dans les meilleures conditions nécessitait une caractéristique en charge du générateur hyperbolique. Cette forme est loin d'être favorable en cas de patinage. Le comportement de la locomotive est amélioré en substituant aux caractéristiques F (v) à puissance constante, des caractéristiques F (v) très tombantes, comme sur une machine à redresseurs.

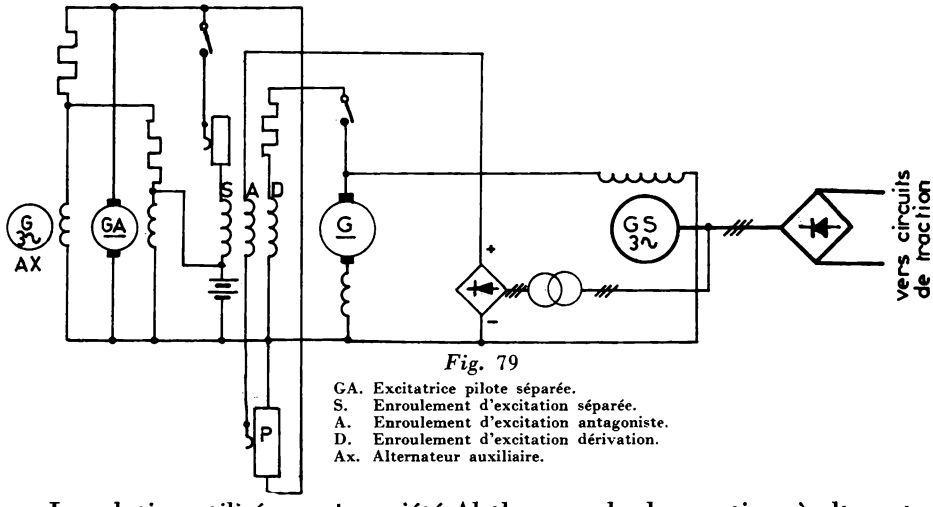


Fig. 79

GA. Excitatrice pilote séparée.
S. Enroulement d'excitation séparée.
A. Enroulement d'excitation antagoniste.
D. Enroulement d'excitation dérivation.
Ax. Alternateur auxiliaire.

La solution utilisée par la société Alsthom sur les locomotives à alternateur consiste à ajouter un enroulement séparé sur l'excitatrice qui a pour but de produire un flux démagnétisant lorsqu'il est parcouru par un courant. Cet enroulement est connecté entre deux points à potentiel variable (*fig.* 79) :

— *un point dont le potentiel est fixé par l'alternateur ;*

— *un point dont le potentiel est réglable par un potentiomètre.*

Si le pont redresseur, alimenté par l'alternateur, délivre une tension supérieure à celle existant sur le potentiomètre, un courant démagnétisant circule

dans l'enroulement d'excitation. Si, au contraire, c'est le potentiomètre qui délivre une tension supérieure, l'enroulement d'excitation n'est parcouru par aucun courant, celui-ci étant bloqué par les redresseurs. Les caractéristiques F(v) obtenues avec cet enroulement excité ont l'allure indiquée sur la *figure* 80. Il est évidemment possible d'utiliser la caractéristique hyperbolique pour les démarrages faciles.

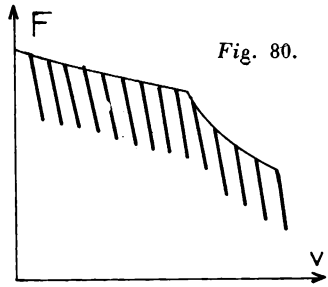


Fig. 80.

1.395. Compensation du cabrage.

La réduction ou l'augmentation du couple sont également utilisées pour compenser le cabrage des essieux déchargés ou surchargés. Par le moyen du shuntage des inducteurs, on arrive à faire varier le couple des moteurs pour qu'ils fournissent aux essieux des efforts sensiblement proportionnels à la charge qu'ils supportent (*fig.* 81).

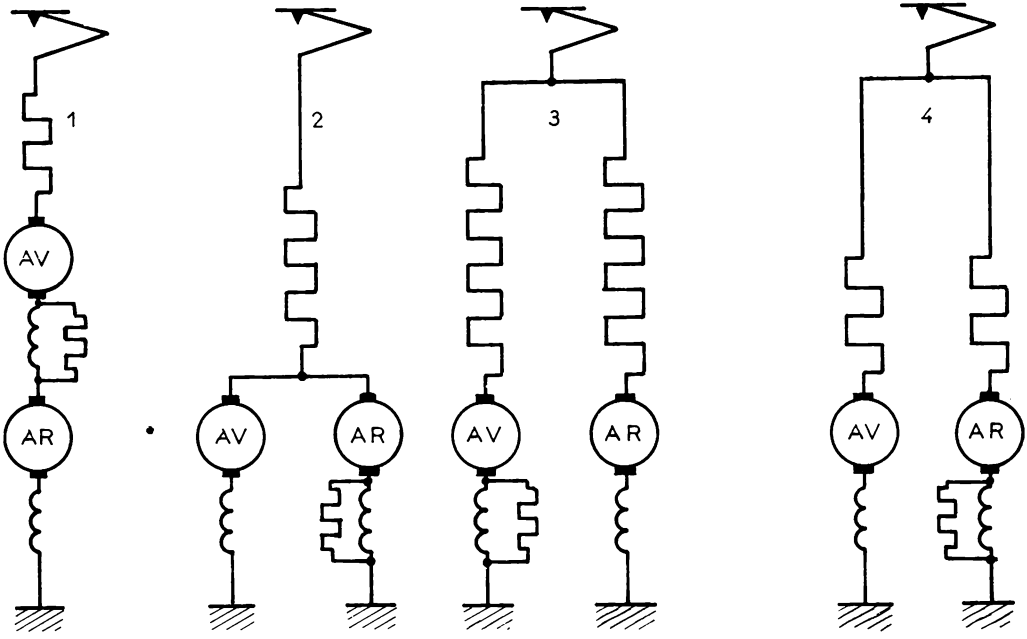


Fig. 81.

1. Shuntage pour couplage série.
2. Couplage parallèle avec rhéostat commun.
3. Couplage parallèle avec rhéostat individuel en début de démarrage.
4. Couplage parallèle avec rhéostat individuel en fin de démarrage.

Dans le cas d'équipements à redresseurs contrôlés, il est également possible de modifier la tension sur certains moteurs.

1.4. — INSTALLATIONS FIXES

On englobe, sous cette désignation, l'ensemble des installations ayant pour rôle d'assurer la fourniture en énergie à la locomotive. On peut effectuer une première classification d'après la nature du courant utilisé :

- **Installations à courant continu 1 500 V.**
- **Installations à courant continu 3 000 V.**
- **Installations à courant alternatif monophasé 15 000 V, 16 Hz 2/3** (1).
- **Installations à courant alternatif monophasé 25 000 V, 50 Hz.**

D'un autre point de vue, on peut distinguer :

- **Les lignes de contact amenant l'énergie jusqu'à la locomotive.**
- **Les sous-stations recevant l'énergie du réseau général** et alimentant les lignes après une transformation convenable.
- **L'appareillage chargé d'établir,** de contrôler, de protéger les liaisons entre les sous-stations et les lignes.

1.41. — LIGNES D'ALIMENTATION

1.411. Conditions d'un service de qualité.

Un circuit de traction électrique diffère des circuits classiques sur les points suivants :

— il est *essentiellement déformable* du fait de l'avancement de la locomotive, celle-ci s'éloignant ou se rapprochant constamment des origines de la source de courant ;

— le *retour du courant se fait par l'ensemble rail-terre ;*

— l'*alimentation se fait par l'intermédiaire d'un contact glissant* à une vitesse pouvant être élevée, la flexibilité de la ligne de contact étant importante.

(1) Utilisé sur les réseaux étrangers.

Il y a lieu de se préoccuper des conditions pour lesquelles :

— la *tension aux bornes de la locomotive est convenable ;*

— le *courant de retour ne provoque pas de corrosion ;*

— la *tenue mécanique de la ligne est acceptable ;*

— les *perturbations apportées par la ligne* sur les circuits de télécommunications sont négligeables.

1.412. Étude des chutes de tension.

Le calcul des chutes de tension est extrêmement complexe, même dans le cas du courant continu, pour lequel il suffit d'appliquer les lois de Kirchhoff. Il nécessite l'emploi de tables de calcul analogique sur lesquelles on reproduit en modèle réduit le réseau avec tous les éléments actifs et passifs. Nous indiquerons simplement les résultats les plus importants :

— la *tension moyenne*, tout au long de la ligne, doit être très voisine de la tension nominale afin que les locomotives fonctionnent dans des conditions normales ;

— la *tension minimale* au point le plus défavorisé, dans les plus mauvaises conditions d'exploitation, ne doit pas être trop faible ;

— la *chute de tension moyenne* est généralement inférieure à 10 % ; la chute de tension maximale admissible varie avec la nature du courant. A titre d'exemple, elle doit être inférieure à 33 % pour le courant continu, 25 % pour le courant alternatif 50 Hz. On définit également des valeurs maximales et des valeurs minimales instantanées.

◆ **Cas du courant continu,**

La chute de tension est due uniquement à la résistance ohmique de la ligne de contact et du rail.

La qualité de service de la ligne dépend à la fois de la section de la ligne et de la distance entre sous-stations. Une qualité identique peut être obtenue en espaçant les sous-stations et en disposant une section de fil importante sur la ligne, ou, au contraire, avec une section moindre de fil et un espace plus restreint entre sous-stations. Il apparaît alors une notion de distance économique correspondant aux moindres frais de réalisation et d'exploitation.

Dans les solutions adoptées par la S.N.C.F., la section de fil est surtout déterminée par les chutes de tension admissibles et l'effet Joule reste faible.

Il existe, pour une ligne donnée, une puissance maximale que l'on ne peut dépasser, toute intensité supplémentaire appelée ayant pour effet de diminuer

la puissance absorbée par la locomotive, tout en augmentant la puissance perdue en ligne (1).

◆ **Cas du courant alternatif.**

La chute de tension est due :

— *à la résistance ohmique* et à la *réactance de la ligne ;* la réactance des lignes à 50 Hz est à peu près égale au triple de la résistance ;

— *à l'intensité appelée par la locomotive* ;

— *au facteur de la puissance de la locomotive.*

Par ailleurs, afin de limiter les effets d'un court-circuit, la réactance interne des transformateurs est relativement élevée ; il s'ensuit qu'une chute de tension non négligeable dans le transformateur vient s'ajouter aux chutes de tension de la ligne.

Il résulte, de ces réactances élevées, qu'une augmentation de section de la ligne n'a pas grande influence sur les chutes de tension, seule la résistance étant diminuée.

Contrairement à ce qui se passe en courant continu, ce n'est plus la chute de tension, mais l'effet Joule qui détermine la section de la ligne. En régime permanent, la densité de courant est sensiblement égale à 4 A/mm^2 pour le cuivre et 2 A/mm^2 pour l'acier.

1.413. Perturbations provoquées par le courant.

Bien qu'il n'y ait aucune liaison électrique réalisée volontairement entre la terre et le rail, le courant de retour emprunte non seulement le rail, mais également le sol.

Au-delà d'une dizaine de kilomètres entre la sous-station et la locomotive, il arrive que la moitié du courant emprunte le sol et plus spécialement les éléments conducteurs enterrés : conduites d'eau, de gaz, égouts, câbles électriques. Il existe ainsi un risque non négligeable de corrosion de ces canalisations.

La protection contre les effets de ces courants vagabonds dans le sol peut être assurée par la mise en œuvre des moyens suivants :

— *diminution de la résistance électrique* des rails par éclissage entre les joints des rails ;

— *isolation des rails par rapport au sol.* Cette disposition présente cependant, en cas de court-circuit entre ligne et rail, des dangers

(1) Problème sensiblement analogue à celui consistant à rechercher les conditions de puissance maximale fournie par une pile.

pour le personnel et elle doit être complétée par des dispositifs de protection ;

— *protection des canalisations par drainage ou soutirage électrique* (1).

D'autres perturbations sont provoquées par la ligne de contact : tensions statiques induites par influence électro-statique (2) sur les lignes de télécommunication, par les lignes à courant continu et les lignes à courant alternatif, tensions induites par les phénomènes d'induction électro-magnétiques sur les lignes voisines (dans le cas des installations à courant alternatif, ou en cas de variation brusque de régime sur les lignes à courant continu).

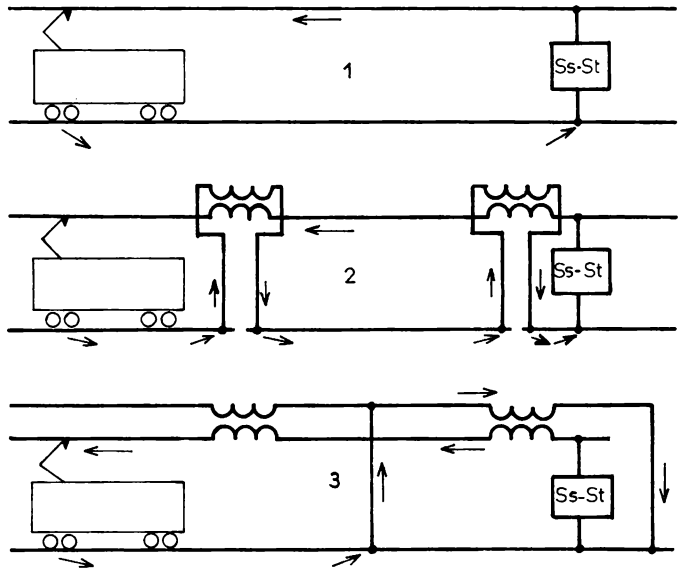


Fig. 82.

1. Retour par le rail.
2. Installation de transformateurs-suceurs sans conducteur spécial de retour.
3. Transformateurs-suceurs avec conducteur spécial de retour. Les flèches indiquent le passage du courant.

La protection contre les troubles résultant des phénomènes d'influence et d'induction est assurée par :

— l'*éloignement des canalisations de télécommunication* ;

— l'*emploi de transformateurs suceurs* (fig. 82) ;

(1) Voir tome 4. Chapitre VII : La protection cathodique.

(2) Voir tome 3. Etude des surtensions.

— *l'emploi de shunts résonnants* L-C série disposés entre la voie et la ligne de contact et accordés sur les fréquences harmoniques engendrées par le redressement (*fig.* 83).

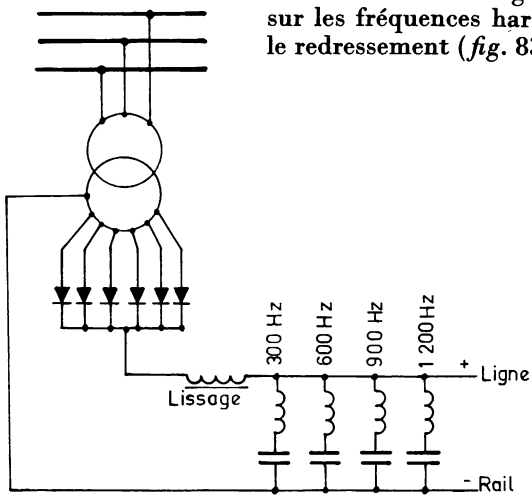


Fig. 83.

1.414. Tenue mécanique des lignes.

Les efforts appliqués à la ligne proviennent du frottement de l'archet de prise de courant et de causes extérieures : vent, givre, verglas, neige. Pour que le contact soit réalisé dans les meilleures conditions, le parallélisme par rapport à la voie est nécessaire. Les solutions utilisées diffèrent suivant la nature du courant et sont indiquées dans les paragraphes ci-après.

1.415. Réalisation des lignes de contact.

La solution du problème posé exige que soient satisfaites simultanément les exigences mécaniques énoncées précédemment et les conditions propres au bon fonctionnement du contact glissant.

Du point de vue électrique, l'expérience a montré que le captage d'intensités élevées (3 000 A en 1 500 V) était possible avec des densités de courant très fortes sous le contact, mais à la seule condition d'assurer la régularité du contact.

Du point de vue mécanique, la régularité du contact suppose une flexibilité constante de la ligne. Ce résultat est obtenu par la suspension caténaire. Les détails de réalisation varient suivant l'intensité à transporter et la vitesse des trains (*fig.* 84). L'effet du vent est atténué par l'emploi de bras antibalançants qui s'opposent au déplacement transversal mais autorisent les déplacements verticaux ou longitudinaux.

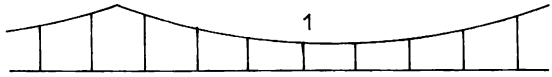
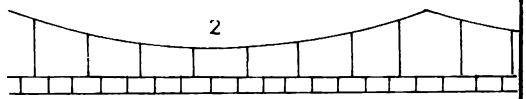
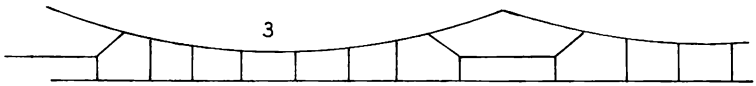


Fig. 84 *a.*

1. Principe de la suspension caténaire.
2. Suspension caténaire composée (1 500 V).
3. Suspension en Y au droit des supports (25 kV).





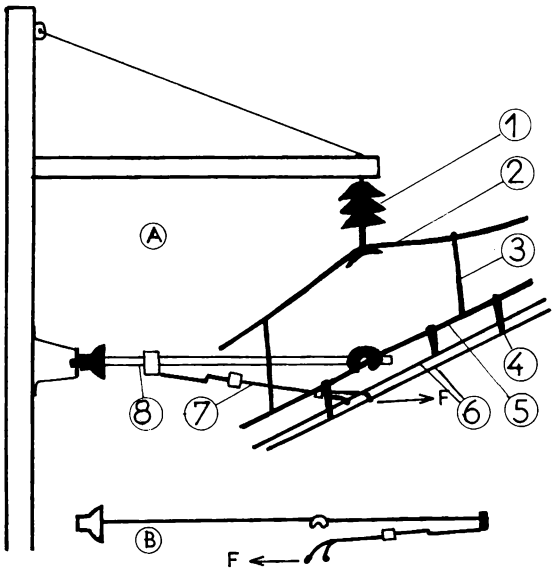


Fig. 84 *b.*

Principe de la fixation des fils sur une ligne 1 500 V.

1. Isolateur. — 2. Porteur principal. — 3. Pendule principal. — 4. Pendule auxiliaire. — 5. Porteur auxiliaire. — 6. Fils de contacts. — 7. Bras de rappel. — 8. Antibalançant.
Les flèches F indiquent le sens de l'action exercée par le fil.
L'antibalançant peut travailler en tension A ou en compression B. Le bras de rappel travaille toujours en tension.

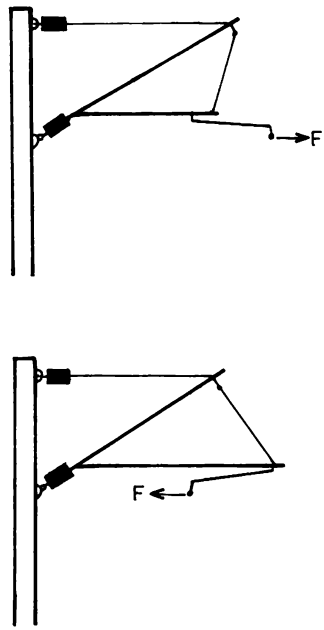


Fig. 84 *c.*

Principe de la fixation des fils sur ligne 25 kV. Les isolateurs ne sont plus situés du dessus du fil de contact mais à proximité des supports.

Il est bon de prévoir un déplacement du point de contact entre la ligne et le pantographe de la locomotive ; c'est pour cette raison que la ligne est désaxée périodiquement par rapport à la voie. Les *tableaux III et IV* indiquent les caractéristiques des caténaires S.N.C.F.

Sous l'effet des variations de température, la tension mécanique de la ligne varie ; cet inconvénient est évité en constituant la ligne par des tronçons de 1 500 m environ dont les extrémités sont reliées à un tendeur à contre-poids (*fig.* 85).

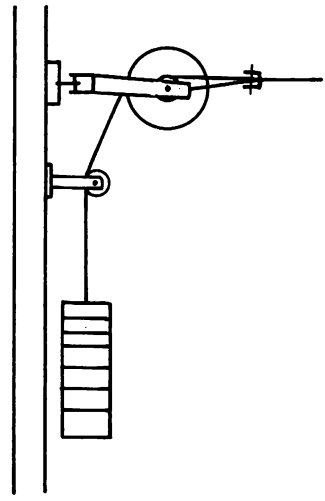


Fig. 85.

1.416. Alimentation des lignes de contact.

L'énergie nécessaire à la ligne de contact est fournie par des sous-stations réparties tout au long de la voie. Nous délaisserons provisoirement l'étude de ces sous-stations pour nous intéresser aux différents schémas de distribution. Les sous-stations reçoivent de l'énergie des réseaux E.D.F. (1), et, après transformation, livrent cette énergie à la voie, d'où la nécessité de considérer simultanément les schémas H.T. (ou primaires) concernant l'alimentation des sous-stations et les schémas de distribution du côté ligne caténaire.

◆ **Sous-stations à courant continu.**

Ces sous-stations sont alimentées en courant triphasé à partir des réseaux régionaux de répartition dont la tension régulée est comprise entre 45 et 90 kV. L'alimentation est faite par une ou deux lignes à haute tension. La *figure* 86 indique les différents schémas possibles ; il suffit de les examiner pour en découvrir les avantages et les inconvénients. Les conditions de réalisation économique imposent des distances entre sous-stations de l'ordre de 20 km en 1 500 V et de 40 km en 3 000 V. Ces distances sont trop faibles pour que le réseau E.D.F. offre la possibilité d'un branchement à proximité de la voie sur chaque sous-station. Un même poste H.T. alimente donc plusieurs sous-stations.

(1) Nous ignorons volontairement le cas des réseaux étrangers à basse fréquence alimentés quelquefois à partir d'un réseau spécial.

TABLEAU III

Caractéristiques des caténaires à courant continu.

Tension	1 500 V	1 500 V
Type de caténaire	Normale	Renforcée
Porteur principal	Bronze au cadmium 116 mm² (88)	Bronze à l'étain 116 mm² (46)
Porteur auxiliaire	Cuivre dur 104 mm² (102)	Cuivre dur 143 mm² (140)
Fil de contact	2 fils cuivre dur 107 mm² (210)	2 fils cuivre dur 150 mm² (294)
Sections équivalentes de cuivre électrolytique en mm².....	400	480

Les nombres entre parenthèses correspondent à la section équivalente en cuivre électrolytique.

TABLEAU IV

Caractéristiques des caténaires à courant alternatif.

Tension	25 kV
Porteur	Bronze à l'étain 65,38 mm² (42,5).
Fil de contact	Cuivre dur 107 mm² (105)
Section équivalente de cuivre électrolytique en mm²	147,5

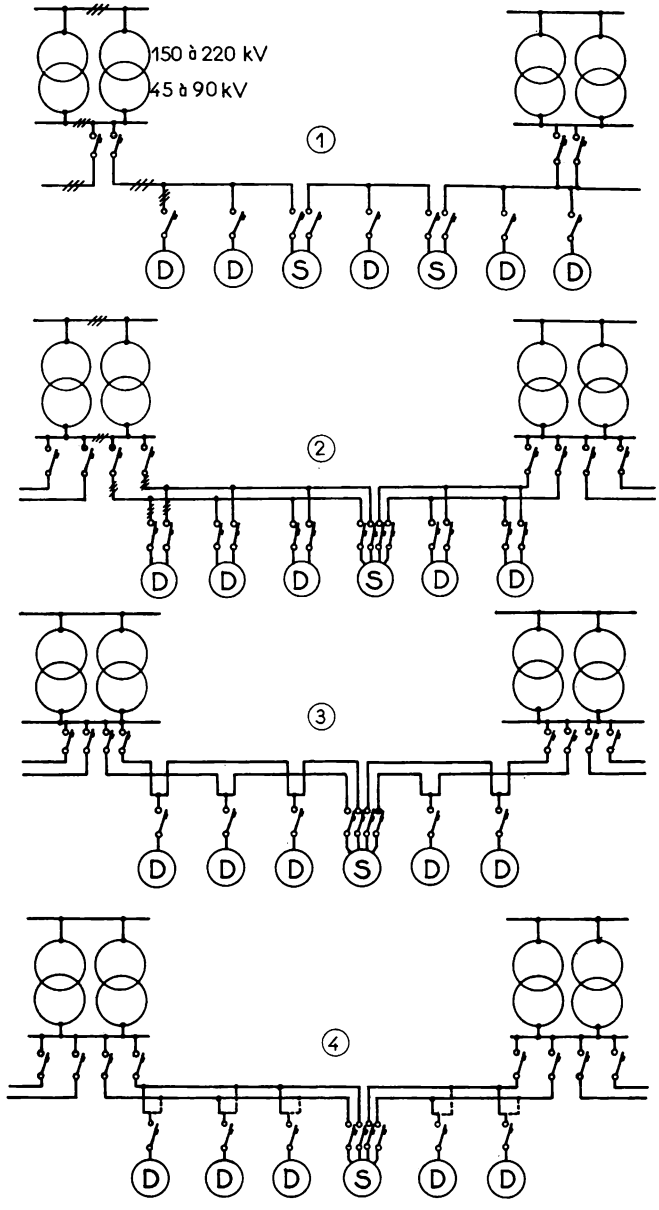
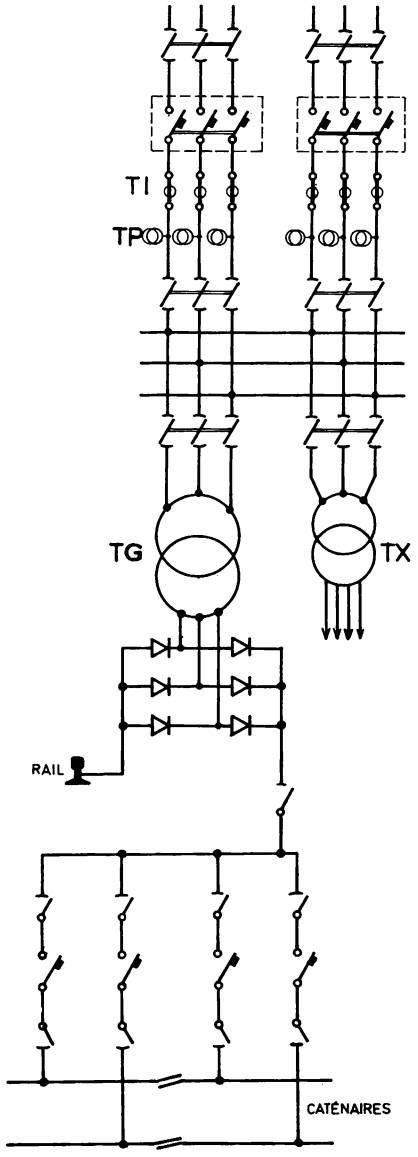


Fig. 86.

1. Alimentation par une seule ligne HT (Paris-Le Mans).
2. Alimentation par deux lignes en parallèle (Paris-Dijon).
3. Alimentation par deux lignes (une ligne alimente une sous-station sur deux) Dijon-Lyon.
4. Alimentation par deux lignes ; chaque sous-station est reliée normalement à une seule ligne, mais il est possible de la connecter à l'autre ligne (Paris-Dijon).

D. Sous-station dérivation.
S. Sous-station sectionnement.
Les schémas des sous-stations S et D sont indiqués sur la *figure* 87.



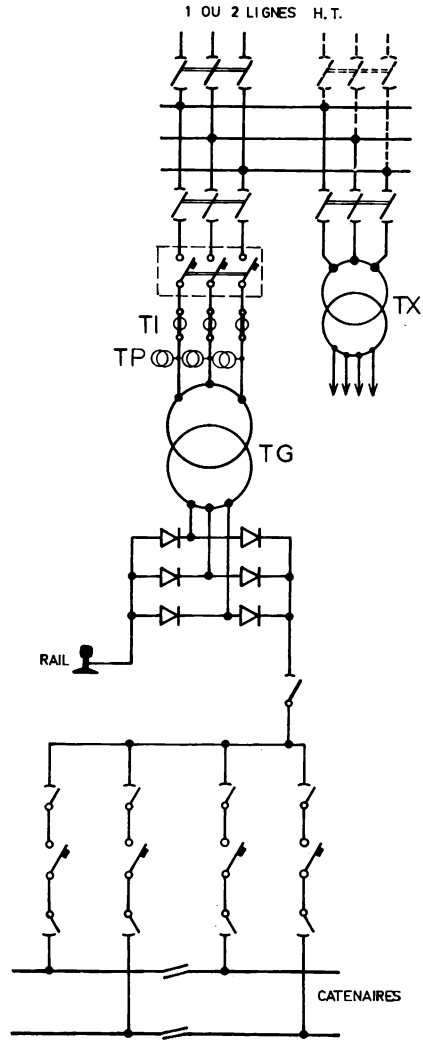


Fig. 87.

Sous-station sectionnement à courant continu 1 500 V. Schéma simplifié.

TG. Transformateur de groupe.
TX. Transformateur des services auxiliaires.
TI - TP. Transformateurs d'intensité, transformateurs de potentiel pour protection de la ligne.

(D'après document S.N.C.F.)

Sous-station dérivation à courant continu 1 500 V. Schéma simplifié.

TG. Transformateur de groupe.
TX. Tranformateur des services auxiliaires.
TI. - TP. Transformateur d'intensité et de potentiel pour comptage et protection du groupe.

(D'après document S.N.C.F.)

Du côté continu, les générateurs débitent sur un jeu de barres à travers un disjoncteur. Le fil de contact est alimenté aux deux extrémités par la polarité positive. La mise en parallèle, entre deux sous-stations, des lignes alimentant une double voie, permet de réduire les chutes de tension ; le sectionnement entre deux sous-stations permet, en cas de disjonction, de continuer l'alimentation sur un demi-tronçon (*fig* 88).

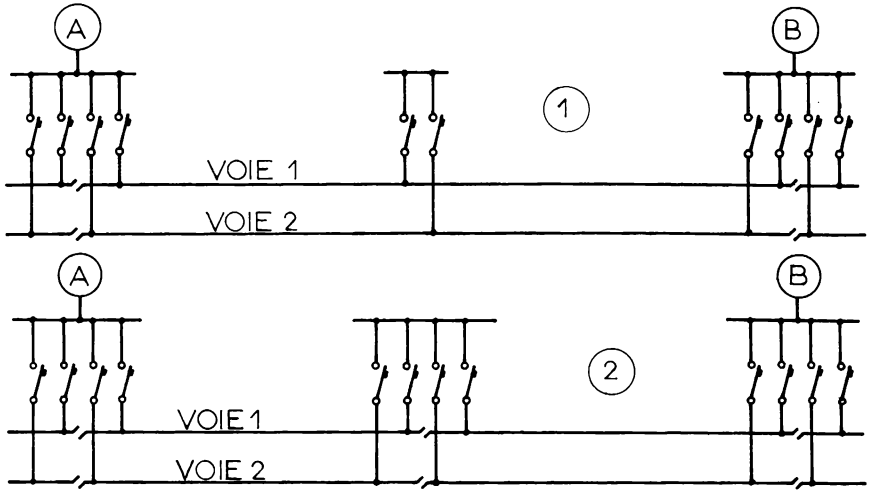


Fig. 88. — Postes intermédiaires entre sous-stations.
A, B. Sous-stations.
1. Poste de mise en parallèle. — 2. Poste de mise en parallèle et de sectionnement.

La protection contre les défauts est assez délicate puisqu'un amorçage franc, entre caténaire et rail, situé à plusieurs kilomètres du départ, peut entraîner un courant inférieur à la charge normale d'une sous-station. On utilise des disjoncteurs sensibles à la vitesse de variation du courant (terme dI/dt). La sélectivité est assurée par la détection des sens de circulation des courants de défauts (1).

◆ **Sous-Stations monophasées 50 Hz.**

La tension élevée permet une augmentation de la distance entre sous-stations jusqu'à 60 km environ, et leur implantation est le plus souvent décidée en fonction du réseau H.T. de l'E.D.F. La notion de sous-station de chemin de fer est de plus en plus abandonnée et les raccordements au réseau général ne demandent plus que des travaux réduits.

La sous-station se réduit à un simple transformateur monophasé connecté entre deux phases. La protection est assurée par des disjoncteurs du côté H.T. et du côté 25 kV.

(1) Voir tome 3. Protections sélectives.

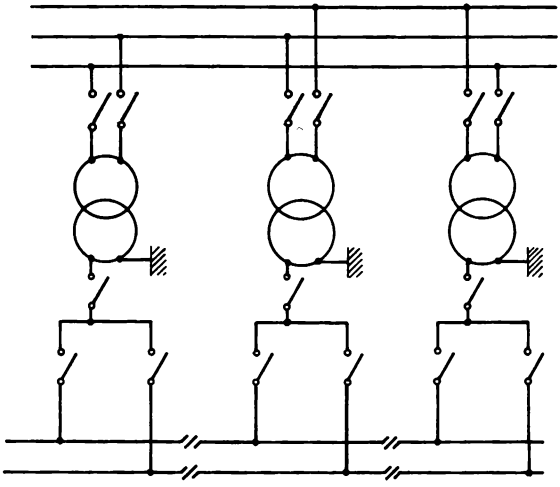
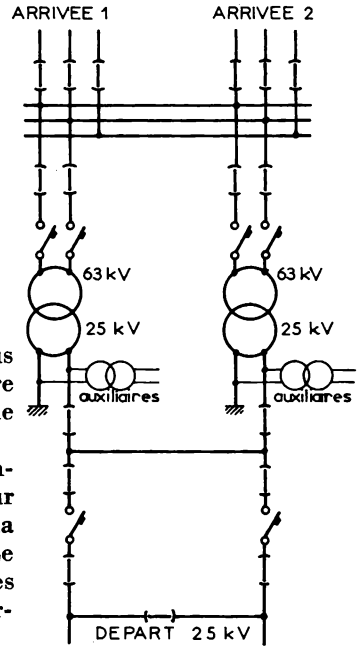


Fig. 89 *a.*
Principe de l'alimentation de sous-stations monophasées. Remarquer le sectionnement des voies entre les sous-stations. Afin de simplifier le schéma, seul les organes de coupure indispensables à la compréhension ont été conservés.

Fig. 89 *b.*
Schéma d'une sous-station monophasée avec un transformateur de réserve. La disposition des sectionneurs et disjoncteurs permet un fonctionnement en cas de panne sur une arrivée, un transformateur ou un départ.



Le *schéma* 89 représente la disposition la plus couramment adoptée. Nous signalerons pour mémoire l'existence de quelques sous-stations équipées de transformateurs Scott (*fig.* 90).

En fonctionnement normal, le déphasage de l'intensité sur la tension est relativement faible (inférieur à 40°), mais, en cas de défaut, la réactance élevée de la ligne provoque un déphasage de l'ordre de 70°. Le système de protection fait appel à des relais sensibles à l'argument de l'impédance vue du point de surveillance.

Pour éviter des déséquilibres trop importants, les différentes sous-stations sont généralement raccordées à des phases différentes, ce qui interdit d'alimenter les tronçons entre deux sous-stations voisines par leurs deux extrémités. Il existe cependant des sous-stations voisines alimentées en parallèle et débitant en parallèle sur la voie.

1.417. Organisation des sous-stations à courant continu.

La conversion du courant triphasé en courant continu est assurée à l'aide de convertisseurs de types divers :

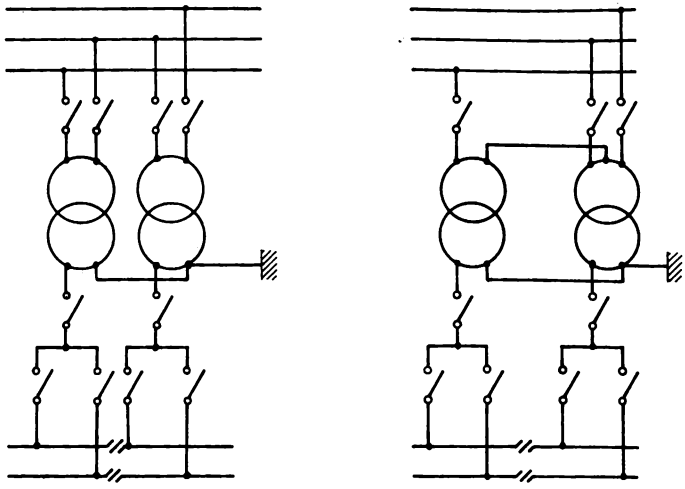


Fig. 90.

— *commutatrices hexaphasées*, en service dans les installations anciennes, mais dont la construction est abandonnée depuis 1930 environ ;

— *redresseurs à vapeur de mercure* avec secondaire en double étoile et bobine d'absorption. Certaines sous-stations sont équipées de redresseurs à grille de commande, ce qui permet de compenser les chutes de tension ;

— *diodes de puissance* au silicium montées en pont triphasé. Ce type de convertisseur est le seul utilisé pour les nouvelles sous-stations.

La puissance des sous-stations varie, suivant les conditions locales d'exploitation, entre 1 200 et 4 000 kW. Leur exploitation s'effectue en télécommande centralisée.

2. Trolleybus [1]

D'un point de vue très élémentaire, on peut définir un trolleybus comme un véhicule de transport en commun muni de pneumatiques et alimenté par une ligne électrique. S'il ne possède pas l'autonomie en énergie d'un autobus à moteur thermique, il se déplace cependant librement sur la chaussée par rapport à l'axe de la ligne d'alimentation.

2.1. — ÉQUIPEMENT MÉCANIQUE

La ressemblance avec un véhicule à moteur thermique est très grande et nous indiquerons seulement que l'on retrouve sur le trolleybus tous les organes classiques :

— carrosserie ;
— pont arrière et transmission ;
— direction ;
— suspension ;
— système de freinage mécanique.

Suivant la puissance envisagée, il est possible de concevoir des équipements avec un ou deux ponts arrière et avec un ou deux moteurs. La *figure* 91 indique les dispositions adoptées.

2.2. — ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE

2.21. — MOTEUR

Les considérations énoncées pour les moteurs de locomotives restent valables, mais il faut tenir compte en plus des conditions assez particulières de fonctionnement des trolleybus : arrêts et démarrages fréquents, profil de chaussée pouvant être très accidenté, existence d'un trafic auquel doit s'incorporer le trolleybus.

Le moteur à excitation série et le moteur à excitation composée à flux additifs peuvent être employés concurremment.

---

(1) Les renseignements concernant les trolleybus nous ont été fournis en grande partie par la Régie Autonome des Transports Parisiens que nous remercions de son obligeance.

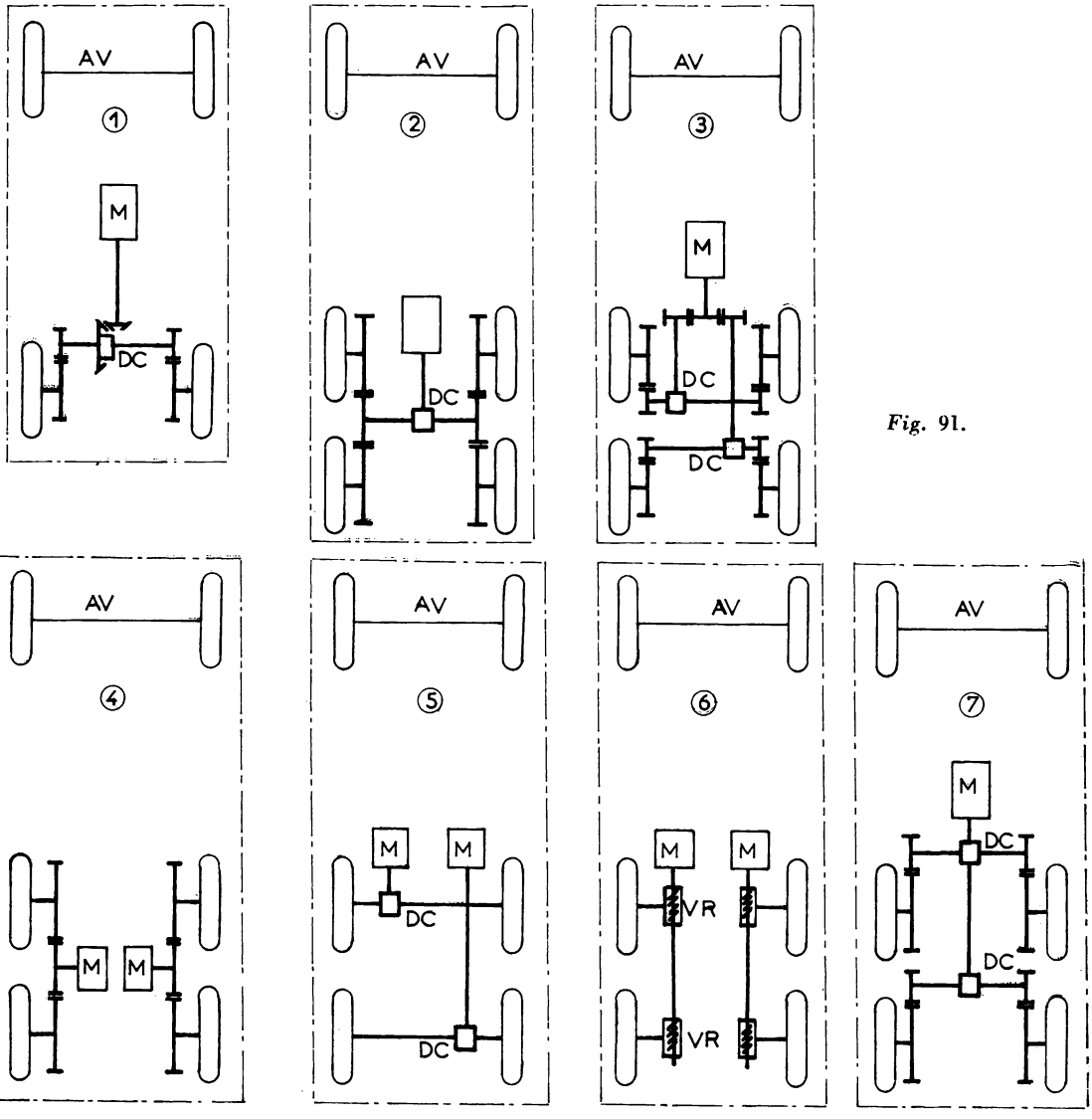


Fig. 91.

AV. Train avant.
M. Moteur.
D.C. Différentiel et couple conique.
V.R. Réducteur à vis et roue.

2.211. Moteur série.

Nous rappelons rapidement les caractéristiques essentielles du moteur série :

- — caractéristique C(I) de forme parabolique favorable aux surcharges ;
- — caractéristiques n(I) et C(n) de forme hyperbolique, entraînant un emballement du moteur pour les faibles charges ;
- — auto-régulation permettant l'adaptation automatique du couple moteur au couple résistant ;
- — freinage rhéostatique possible par inversion des connexions entre l'induit et l'inducteur ;
- — réglage de la vitesse possible, soit par le montage de résistances en série avec l'induit, soit par pontage des inducteurs.

Du point de vue de la conduite, le moteur série ne permet pas au conducteur de régler exactement la vitesse du véhicule, ni de la maintenir à une valeur déterminée ; les équipements permettant un réglage suffisamment fin seraient d'une complexité et d'un encombrement prohibitif. Dans la pratique, il peut être nécessaire de conduire en admettant le courant pendant un temps plus ou moins long, puis de laisser le véhicule continuer sur l'erre ou de recourir au freinage rhéostatique.

2.212. Moteur à excitation composée à flux additifs (1).

Supposant connues les propriétés essentielles de ce type de moteur, nous indiquerons comment peuvent se déplacer ses caractéristiques sous l'effet des variations du flux dérivation.

Si le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux série est proportionnel à l'intensité dans l'induit et le flux dérivation à la tension aux bornes des inducteurs dérivation. Il est possible d'agir volontairement sur la valeur du flux dérivation par insertion de résistances en série dans les inducteurs dérivation.

◆ **Caractéristiques n(I)** (*fig.* 92).

La zone dans laquelle peut se trouver la caractéristique est limitée par :

- — la droite verticale I = 0 ;
- — la droite verticale I_{max1} ;
- — la droite horizontale n_{max1} correspondant à des impératifs de sécurité et de réglementation de circulation ;
- — la courbe n(I) à flux dérivation maximal ;
- — la courbe n(I) à flux dérivation nul.

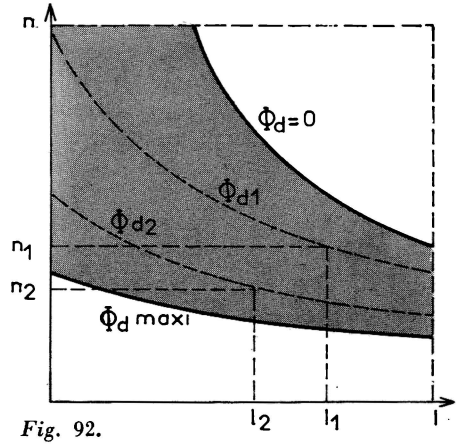


Fig. 92.

(1) Appelé plus couramment, mais d'une façon impropre, moteur compound.

Tout point de cette zone correspond à une vitesse qui peut être atteinte pour une valeur déterminée du flux dérivation.

◆ **Caractéristiques C (I).**

Les caractéristiques de couple peuvent se déplacer dans une zone limitée par (*fig.* 93) :

— la droite verticale I_{max1} ;
— la courbe C(I) à flux dérivation nul ;
— la courbe C(I) à flux dérivation maximal.

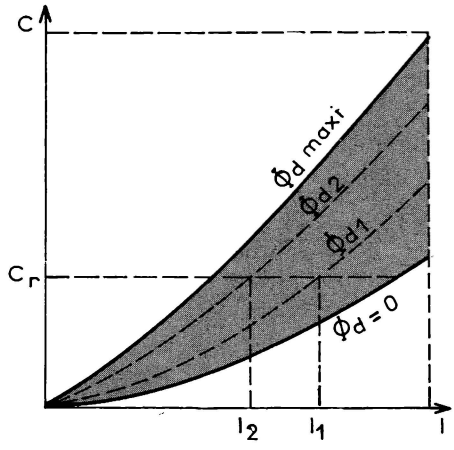


Fig. 93.

Tout point de cette zone correspond à un couple qui peut être atteint pour une valeur déterminée du flux dérivation.

◆ **Conditions de fonctionnement.**

Considérons une valeur définie du couple résistant. Le couple moteur nécessaire pour équilibrer ce couple résistant peut être obtenu avec plusieurs valeurs du flux dérivation (soit par exemple Φ_{d_1} et Φ_{d_2} ce qui entraîne autant de valeurs du courant traversant l'induit.

Si nous examinons maintenant les réseaux N(I), nous voyons qu'à chacune de ces valeurs de I, correspond une valeur de la vitesse.

En conclusion, pour une valeur déterminée du couple résistant, il est possible de définir plusieurs valeurs de la vitesse en modifiant les valeurs du courant d'excitation dérivation.

Il est également possible de faire varier la vitesse en modifiant la tension d'induit par insertion de résistances en série. Cette méthode, à cause des pertes d'énergie qu'elle entraîne, n'est utilisée qu'au démarrage.

Dans le cas d'équipements comportant deux moteurs, l'étendue du réglage de vitesse par le flux dérivation peut être suffisante pour qu'il ne soit pas nécessaire d'envisager les couplages série et parallèle au démarrage.

◆ **Freinage électrique.**

Les conditions de freinage électrique sont différentes de celles du moteur série.

Le moteur peut fonctionner en génératrice sans modification des connexions entre l'induit et les inducteurs. Considérons un point de fonctionnement, P, par exemple, correspondant à une intensité I, une vitesse n, un couple C et un flux dérivation constant Φ_d (*fig.* 94).

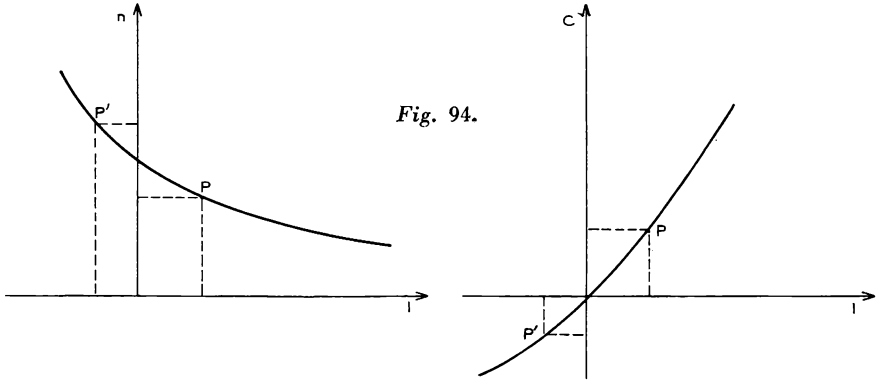


Fig. 94.

Si la vitesse croît, sans que le flux dérivation soit modifié, dans une déclivité par exemple, le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique $n(I)$ dans le sens des vitesses croissantes, ce qui entraîne une diminution de l'intensité ; le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique C(I) dans le sens d'une diminution du couple.

Si la vitesse augmente suffisamment, le couple et l'intensité peuvent s'annuler et même changer de signe, le point de fonctionnement passant de P en P'_1. Le moteur fonctionne alors en génératrice et oppose un couple résistant.

De même, lorsque le flux dérivation varie de Φ_{d1} à une valeur supérieure Φ_{d2} et que la vitesse reste constante, le point de fonctionnement se déplace de P vers P'_1 dans le sens indiqué sur la *figure* 95. Le courant diminue et peut même s'inverser, le moteur fonctionne alors en génératrice.

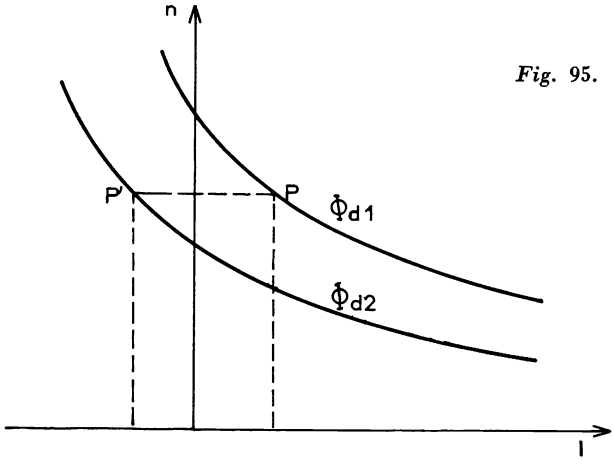


Fig. 95.

Dans les deux cas, la génératrice fonctionne avec un enroulement série à flux soustractif et l'intensité dans l'induit se trouve limitée.

Quelles que soient les causes qui déterminent le fonctionnement en génératrice, l'inversion du couple et de l'intensité entraînent un freinage par récupération si l'énergie produite peut être consommée, soit par d'autres trolleybus sur la ligne, soit à la sous-station.

2.213. Utilisation des deux types de moteur.

Sur l'ensemble des différents pays ayant des réseaux de trolleybus, les deux moteurs sont utilisés à peu près à égalité. En France, on préfère le moteur à excitation composée.

Le moteur série est apprécié pour :

— la simplicité de sa construction, son poids et son prix plus faible que le moteur composé ;

— la simplicité des manœuvres ;

— la possibilité des couplages série et parallèle dans le cas où l'on utilise deux moteurs ;

Le moteur composé présente les avantages suivants :

— possibilité de freinage par récupération ;

— fonctionnement possible dans une gamme de vitesses très étendue sans résistances en série avec l'induit ;

— grande souplesse de conduite, l'accélération et le ralentissement étant commandés par la seule variation du champ dérivation.

2.22. — ORGANES DE RÉGULATION.

Le démarrage, le réglage de la vitesse et le freinage électrique sont sous la dépendance des organes de régulation chargés d'établir les connexions. Afin que le conducteur puisse conserver les mains libres pour la manœuvre du volant de direction et des appareils de signalisation, les organes de régulation sont commandés par des pédales. Il est possible d'agir directement sur les circuits de puissance ou au contraire sur des circuits de télécommande.

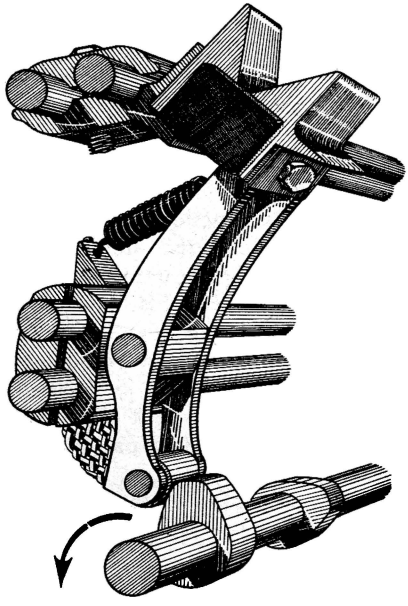


Fig. 96.
Trolleybus. — Appareil de régulation à action directe à cames.

2.221. Régulation par action directe.

Les réalisations pratiques font appel à deux types de commande :

◆ **Commande par came** (*fig.* 96).

Les contacts élastiques sont conçus pour réaliser des manœuvres brusques. Il est possible de répartir les commandes sur deux arbres à cames (couplages série et parallèle dans le cas de deux moteurs) commandés chacun par une pédale et verrouillés de telle sorte que leur manœuvre simultanée ne soit pas

possible. L'encombrement de ces dispositifs est important et la transmission mécanique du mouvement exige leur installation dans le poste de conduite. De plus, l'effort physique demandé au conducteur est important .

◆ **Commande par paillettes** (*fig.* 97).

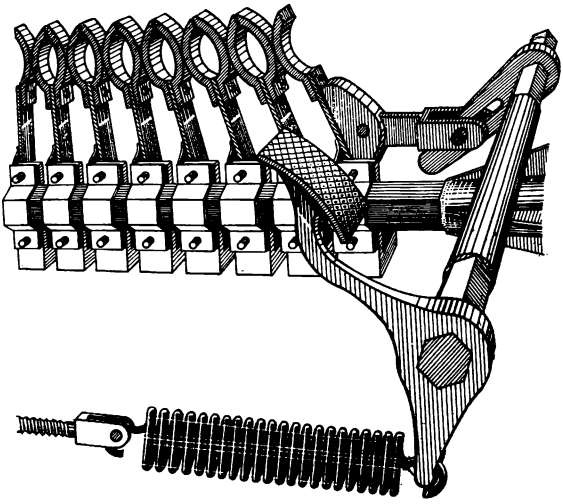


Fig. 97. — Trolleybus.
Appareil de régulation à action directe à paillettes.

Les contacts sont établis entre des doigts montés à l'extrémité de lames métalliques élastiques superposées. L'effort de manœuvre est encore important, mais l'encombrement est réduit, l'entretien très facile et il est possible de disposer un soufflage électromagnétique. Comme ces équipements ne peuvent réaliser que des ouvertures ou fermetures successives, ils ne sont employés que sur les trolleybus à un seul moteur.

2.222. Régulation par action indirecte.

Deux systèmes sont utilisés.

◆ **Régulation par servo-moteur.**

L'ensemble comprend essentiellement un arbre à cames attaqué par un moteur électrique, le moteur électrique étant lui-même commandé par un combinateur à pédale à trois positions : repos, marche à allure réduite, marche à allure normale.

Dans la position de marche à vitesse réduite, toutes les résistances de démarrage sont hors service et le champ inducteur est maximal.

Dans la position de marche à vitesse normale, le champ inducteur est réduit.

En position de repos, toutes les résistances de démarrage sont en série avec le moteur.

Pour les équipements à deux moteurs, le couplage série est utilisé sur les positions repos et marche à vitesse réduite, le couplage parallèle est utilisé en marche normale.

Le passage sur les positions intermédiaires se fait automatiquement après la manœuvre de la pédale. Ce passage est contrôlé par un régulateur d'intensité et n'est autorisé que dans la mesure ou l'intensité est inférieure à une valeur déterminée.

◆ **Régulation par contacteur.**

Les contacteurs électromagnétiques sont commandés au moyen d'un combinateur manœuvré par une pédale. Les courants mis en œuvre étant de faible intensité, une batterie d'accumulateurs est suffisante comme source d'énergie. Les équipements à contacteurs sont robustes, peu encombrants, et d'un entretien facile.

2.23. — AUTRES ORGANES

En plus des moteurs et des équipements de régulation, un trolleybus comprend un certain nombre d'autres organes ayant pour fonction :

◆ **D'assurer la protection contre les surintensités et les surtensions** par fusibles, disjoncteurs et relais de tension ;

◆ **De contrôler les conditions de marche** : intensité, tension, en valeur et en sens, résistance d'isolement ;

◆ **De répondre aux exigences du Code de la Route et de la sécurité de circulation** : éclairage, signalisation, avertisseurs, essuie-glaces, sonnerie de départ et d'arrêt.

La *figure* 98 indique le schéma d'équipement d'un trolleybus.

2.24. — PROTECTION DES VOYAGEURS CONTRE LES DÉFAUTS D'ISOLEMENT

Le trolleybus étant isolé du sol par ses pneumatiques, la d.d.p. entre le sol et le véhicule peut prendre une valeur quelconque. Le voyageur touchant à la fois la terre et la masse du véhicule au moment de la montée ou de la descente ne doit ressentir aucun effet. L'isolement des équipements électriques par rapport aux masses métalliques revêt donc une importance considérable. A cet effet, l'équipement doit satisfaire à des exigences multiples :

— isolation renforcée et protection mécanique par gaine de cuir ou de caoutchouc sur les câbles d'alimentation du circuit à 600 V (1) ;

(1) La tension nominale de fonctionnement des trolleybus est fixée à 600 V.

Fig. 98. — Schéma général des connexions d'un trolleybus.

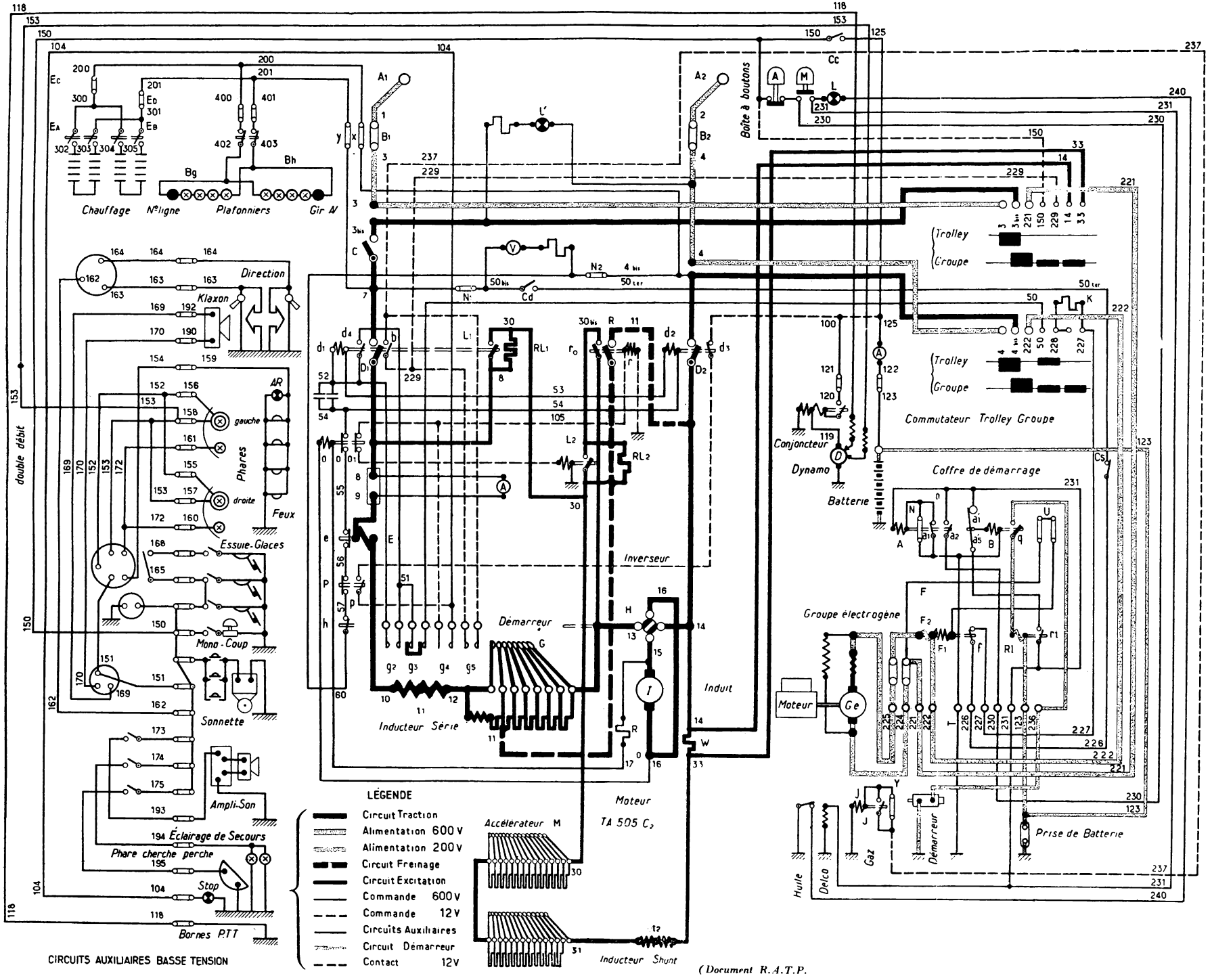


Fig. 98. — Schéma général des connexions d'un trolleybus.

— isolation de tous les circuits sur les deux pôles ;
— double isolation des pièces sous tension des organes de régulation ;
— écrans séparateurs d'arc entre les organes sous 600 V et les autres circuits ou les masses ;
— absence de points communs entre les circuits alimentés par la ligne aérienne et les circuits alimentés par batteries d'accumulateurs ou générateurs à basse tension ;
— montage des bases de trolley sur des charpentes en bois, et isolation par rapport à ces charpentes ;
— isolation des têtes de perche par rapport aux tubes qui les supportent ;
— coupure à l'arrêt du circuit de traction sur les deux pôles ;
— câbles de traction sous tubes isolants et connexions en boîtes étanches ;
— isolation des douilles d'éclairage et des appareils de chauffage, à la fois par rapport à la masse et aux conducteurs d'alimentation ;
— marchepieds et poignées montoires isolants ;
— mise à la masse du trolleybus de la polarité mise à la terre, dans le cas ou la distribution est faite avec un pôle à la terre ;
— montage d'un potentiomètre à point milieu suivant schéma de la *figure* 99, lorsque la distribution est faite avec deux pôles isolés ;
— montage de pneumatiques conducteurs.

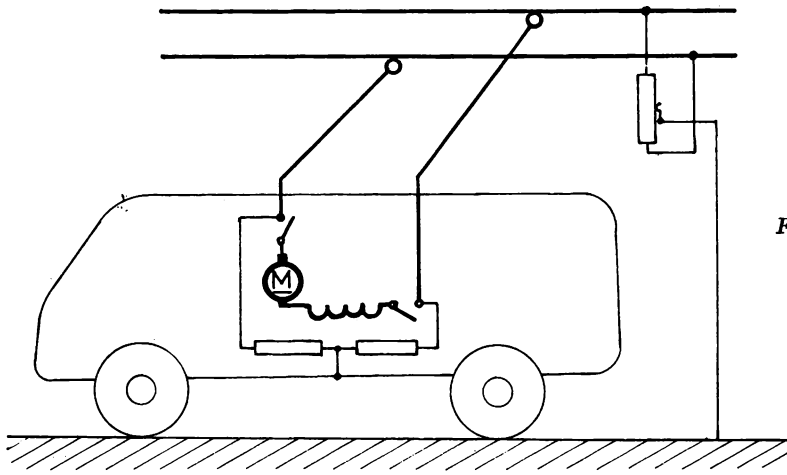


Fig. 99.

2.25. — DISPOSITIFS D'AUTONOMIE

Ils sont prévus sous la forme de batteries d'accumulateurs ou d'un groupe électrogène et permettent les manœuvres en dépôt ou des déplacements limités à vitesse réduite.

2.3. — ALIMENTATION EN ÉNERGIE

L'énergie électrique est fournie au véhicule sous forme de courant continu sous une tension généralement de 600 V. La ligne aérienne comprend deux conducteurs reliés à des sous-stations par des câbles appelés artères (1) d'alimentation.

2.31. — LIGNE AÉRIENNE (*fig.* 100).

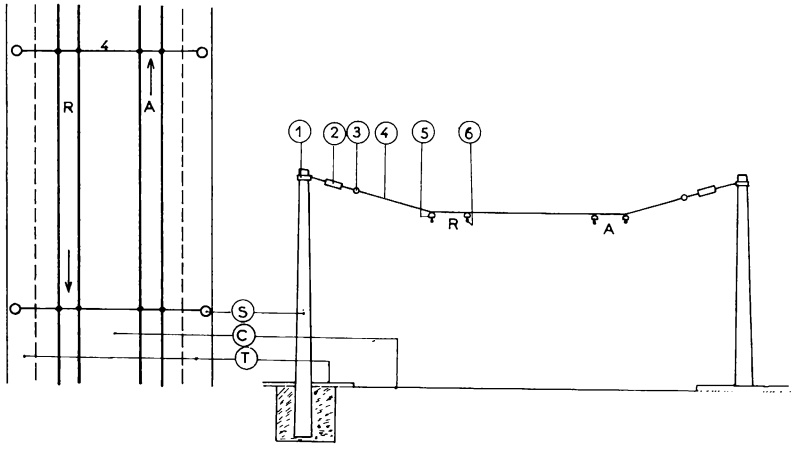


Fig. 100.

T. Trottoirs.
C. Chaussée.
S. Support.
A. Voie aller.
R. Voie retour.

1. Collier.
2. Tendeur.
3. Boule isolante.
4. Câble transversal.
5. Isolateur de suspension.
6. Fil conducteur.

Elle est constituée par des conducteurs généralement en cuivre. Leur section présente une rainure pour permettre la fixation du conducteur. Les fils de contact sont suspendus à des câbles transversaux par l'intermédiaire d'isolateurs. La suspension peut être rigide ou souple suivant que le fil de contact est fixé directement à l'isolateur ou par l'intermédiaire de pendules. La suspension caténaire n'est pratiquement jamais employée.

Les câbles de suspension sont maintenus par des supports en béton armé ou en acier. Dans certains cas, ils sont fixés sur des supports appelés rosaces et scellés dans les murs des maisons.

Des organes divers (isolants des câbles de suspension, griffes d'ancrage, isolateurs de sectionnements, tendeurs, colliers de fixation, parafoudres) complètent la ligne.

(1) Appelés aussi, mais improprement « feeders ».

Un problème particulier est posé par les bifurcations et les croisements.

Une même ligne électrique peut alimenter des véhicules ayant un tronçon de parcours commun, mais elle doit se dédoubler en dehors du parcours commun. Des aiguillages électriques permettent aux dispositifs de prise de courant de franchir la bifurcation dans la direction désirée. Le principe en est donné par la *figure* 101.

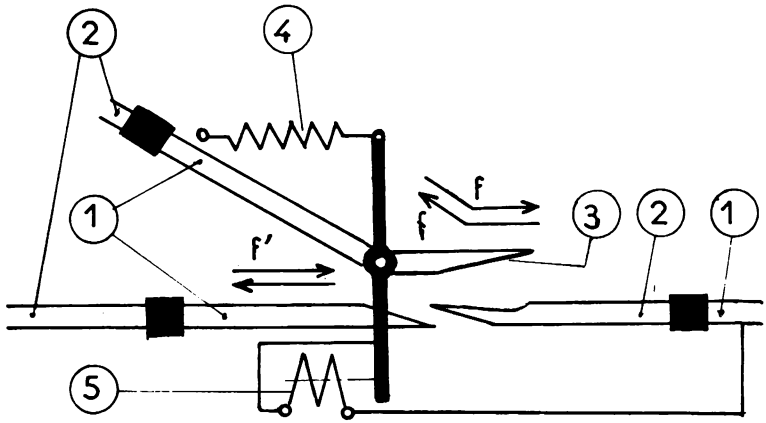


Fig. 101.

1. Fil trolley sous tension.
2. Fil trolley isolé.
3. Aiguille.
4. Ressort de rappel de l'aiguille.
5. Electro-aimant de commande de l'aiguille (alimenté pour les directions *f* par le courant prélevé par la voiture). Pour les directions *f'* ⑤ n'est pas alimenté.

Dans les croisements, le guidage mécanique de l'organe de prise de courant doit être assuré, mais sans qu'il y ait de liaisons électriques entre les fils de polarités différentes. La *figure* 102 en illustre le principe.

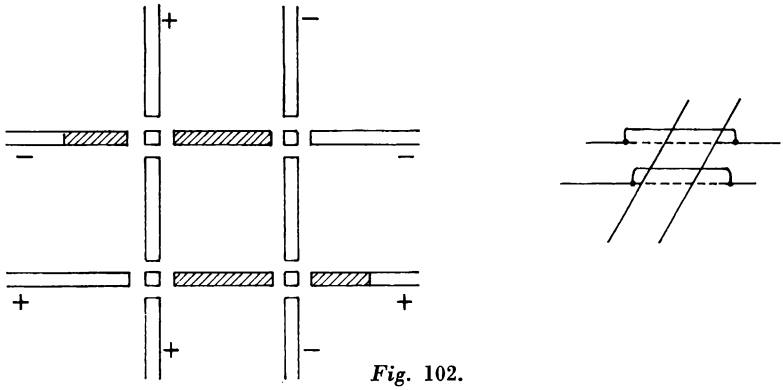


Fig. 102.

2.32. — ORGANES DE PRISE DE COURANT (*fig.* 103).

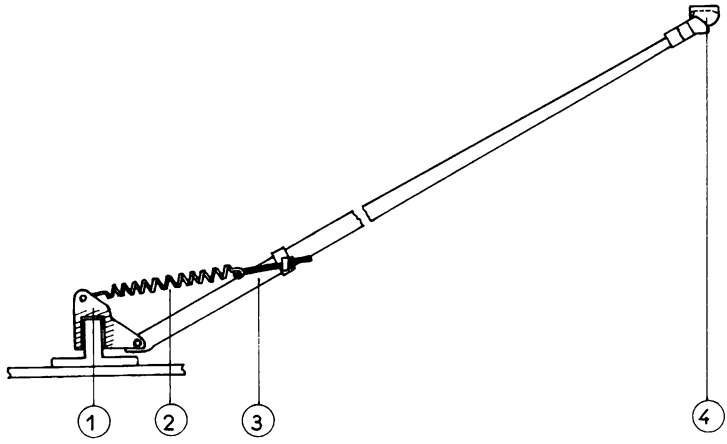


Fig. 103.

L'ensemble comprenant un pivot, une perche et une tête pour chaque polarité, doit permettre une captation du courant sans étincelles, sans bruit et doit autoriser un déplacement du véhicule dans une zone importante de part et d'autre du plan vertical passant par l'axe de la ligne aérienne.

L'organe de captation est généralement un frotteur muni d'un balai en graphite ou métallographitique. La tête supportant le frotteur lui assure un mouvement autour d'un axe horizontal et d'un axe vertical.

La perche constituée par un tube d'acier *rétreint* est mobile dans un plan vertical et dans un plan horizontal.

La tension des frotteurs sur le fil est assurée par des ressorts fixés d'une part à la perche, d'autre part à la partie mobile du pivot.

La tête est isolée de la perche qui est elle-même isolée de la toiture du véhicule.

Un câble isolé passant à l'intérieur des tubes conduit le courant de la ligne à l'équipement intérieur.

2.33. — SOUS-STATIONS D'ALIMENTATION

Leur organisation s'apparente à celle des chemins de fer. Elles reçoivent de l'énergie sous forme de courant triphasé à haute tension et après transformation et redressement, elles délivrent du courant continu.

Si les redresseurs ne permettent pas de retourner vers le secteur l'énergie récupérée en freinage, et si elle ne peut pas être utilisée par d'autres trolleybus

sur la ligne, cette énergie doit être détruite à la sous-station. A cet effet, des relais de tension détectent les élévations anormales de tension qui se manifestent lorsque des véhicules fonctionnent en récupération ; il y a alors ouverture des interrupteurs reliant les redresseurs à la ligne et liaison de la ligne à des résistances d'absorption. Les connexions normales sont rétablies sous l'effet des relais d'intensité qui entrent en action lorsque le courant récupéré s'annule.

2.4. — ÉTUDE CRITIQUE DE LA TRACTION PAR TROLLEYBUS

Une analyse même sommaire des caractéristiques d'exploitation fait ressortir en faveur des trolleybus un certain nombre d'avantages et quelques inconvénients.

Par rapport aux autobus, l'obligation de prévoir une ligne d'alimentation entraîne des dépenses de premier établissement élevées. De plus, du point de vue esthétique, la présence des supports, des câbles de suspension et des lignes d'alimentation peut modifier les caractères de certains quartiers.

En regard de ces inconvénients, il faut accorder aux trolleybus les avantages suivants :

— couple moteur élevé au démarrage ;
— silence de fonctionnement ;
— souplesse de marche ;
— faibles dépenses d'entretien du matériel roulant ;
— vitesses commerciales élevées ;
— absence totale de gaz d'échappement et d'odeurs.

A une époque où, dans la plupart des centres urbains, il devient urgent de lutter contre le bruit et la pollution atmosphérique, le trolleybus constitue un moyen de transport en commun dont les avantages semblent quelquefois échapper aux urbanistes.

3. Camions électriques [1]

Un camion électrique peut se définir comme un véhicule destiné à effectuer des transports et à circuler sur toutes les voies publiques. L'énergie électrique est fournie par des accumulateurs.

3.1. — ORGANISATION MÉCANIQUE

Par rapport au véhicule à moteur thermique, il y a lieu de noter quelques différences tenant aux caractéristiques propres du camion électrique :

— le châssis doit être prévu pour recevoir la batterie d'accumulateurs ;

— les organes de transmission, de constitution classique, doivent être prévus pour résister aux couples importants du moteur ;

— l'accouplement entre moteur et roues doit être particulièrement bien étudié. Il peut être nécessaire de le prévoir vraiment élastique et de le munir d'un limiteur de couple ;

— l'essieu directeur et les autres organes de direction doivent permettre une très bonne maniabilité en raison des conditions spéciales d'emploi des camions électriques. Dans des cas spéciaux, il peut être nécessaire de prévoir deux postes de conduite, un pour la marche avant et un pour la marche arrière (*fig.* 104) ;

— afin d'éviter une consommation excessive, les pneumatiques sont gonflés à haute pression. En raison des vitesses réduites atteintes par les véhicules, la charge nominale d'un pneumatique peut être majorée jusqu'à 30 % par rapport aux valeurs admises sur un véhicule à moteur thermique ;

— la boîte de vitesses et l'embrayage sont supprimés.

(1) La société Sovel nous a fourni des renseignements concernant les camions électriques. Nous la remercions de son obligeance.

3.2. — ORGANISATION ÉLECTRIQUE.

3.21. — TYPE DE MOTEUR

Les moteurs sont généralement du type série. Il est possible de concevoir des véhicules à un ou plusieurs moteurs. Dans ce dernier cas, les organes de transmission sont grandement simplifiés, puisque chaque moteur peut attaquer une roue motrice. Les moteurs doivent pouvoir supporter sans danger les vitesses de rotation élevées dues à un emballement en descente.

Des camions ont été équipés avec des moteurs à excitation composée à flux additifs.

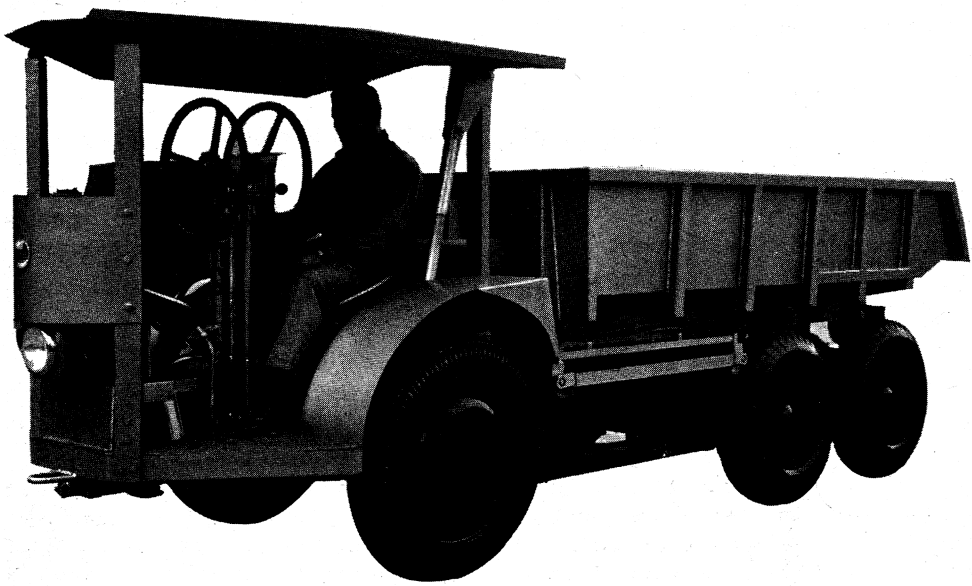


Fig. 104.

3.22. — ORGANES DE RÉGULATION

Le démarrage des moteurs s'effectue par mise sous tension progressive obtenue par des couplages série-parallèle sur les demi-batteries, sur les demi-inducteurs et par insertion de résistances. Il y a en général cinq temps de démarrage répartis différemment suivant qu'il s'agit de véhicules à un ou deux moteurs.

◆ **Véhicules à un moteur.**

Le démarrage se fait avec les schémas suivants (*fig.* 105) :

— demi-batteries en parallèle, avec demi-inducteurs et résistance en série (1) ;

— demi-batteries en parallèle, avec demi-inducteurs en série (2) ;

— demi-batteries en parallèle, demi-inducteurs en parallèle (3) ;

— demi-batteries en série, demi-inducteurs en série (4) ;

— demi-batteries en série, demi-inducteurs et résistance en parallèle (5) ;

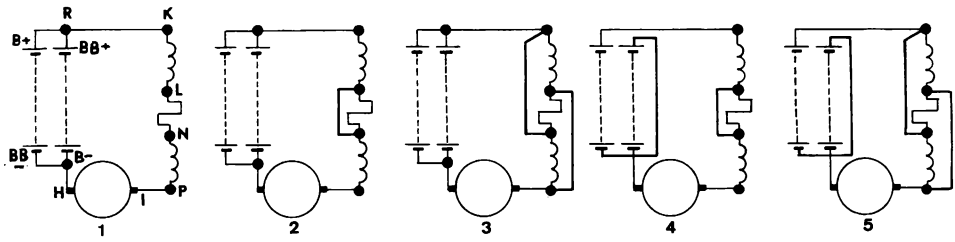


Fig. 105.

◆ **Véhicule à deux moteurs.**

On trouve les couplages suivants :

— demi-batteries en parallèle alimentant les deux induits, deux inducteurs et la résistance branchés en série ;

— demi-batteries en parallèle alimentant le même circuit sauf la résistance qui est en parallèle sur les inducteurs ;

— demi-batteries en série alimentant les induits, les inducteurs et la résistance en série ;

— demi-batteries en série alimentant le même circuit qu'en position 2 ;

— demi-batteries en série, alimentant les deux moteurs en parallèle.

Les différentes combinaisons sont obtenues :

— soit par la manœuvre d'un contrôleur à tambour agissant sur les circuits principaux ;

— soit par un ensemble de contacteurs, le tambour commandant seulement les bobines des contacteurs.

L'inversion de marche se fait par inversion du courant, soit sur l'induit, soit sur les inducteurs.

Des essais sont réalisés avec des équipements électroniques permettant la mise sous tension par impulsion. L'ensemble fonctionne d'après le principe suivant :

— le moteur est mis sous pleine tension ;
— le courant s'établit très rapidement suivant une fonction du temps qui dépend de l'inductance du moteur ;
— lorsque le courant atteint une certaine valeur, il est coupé et le moteur est mis en court-circuit ;
— l'énergie magnétique emmagasinée par le moteur crée un courant décroissant de même sens que le courant fourni par la batterie ;
— lorsque ce courant d'auto-induction atteint une valeur minimale, le moteur est remis sous pleine tension et le même cycle recommence ;
— à la vitesse maximale, le moteur est constamment sous pleine tension.

Pendant la période de démarrage, il y a environ une centaine de cycles par seconde.

L'intérêt de ce système réside dans :

— la suppression des pertes dans la résistance de démarrage ;
— la mise en vitesse progressive, très appréciée dans le cas de véhicules transportant des voyageurs ou des charges mal équilibrées.

3.23. — BATTERIE D'ACCUMULATEURS

La tension est normalisée à 96 V, ce qui correspond à 48 éléments au plomb, ou 80 éléments alcalins. Les capacités varient avec la masse totale du véhicule, et son rayon d'action (voir exemples plus loin).

3.24. — APPAREILLAGE

En plus de l'appareillage de démarrage dont il a été question, l'équipement d'un camion électrique comprend :

— un compteur ampèreheuremétrique qui permet de connaître à tout instant l'état de décharge de la batterie d'accumulateurs. Il est possible de l'utiliser à la charge pour connaître la quantité d'électricité absorbée et pour couper le courant en fin de charge ;

— des organes de sécurité permettant : la coupure des différents circuits pour isoler la batterie à l'arrêt et pour les opérations d'entretien, la limitation du courant, la coupure du courant en cas de freinage mécanique ;

— une prise de courant spéciale permettant de relier la batterie d'accumulateurs à un poste de charge ;

— des accessoires divers : avertisseurs, éclairage, signalisation, essuie-glaces.

Il y a lieu de noter que pour éviter les inconvénients résultant d'un mauvais isolement, tous les circuits sont entièrement isolés de la masse.

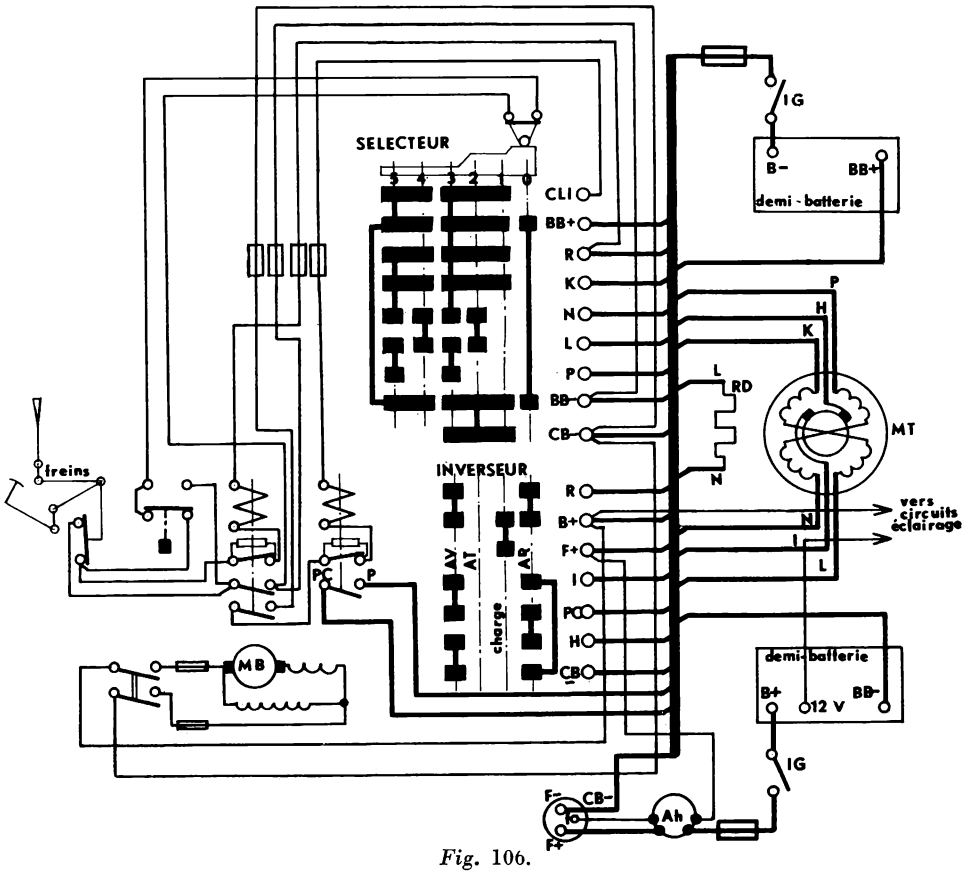


Fig. 106.

Schéma simplifié d'un camion électrique à un moteur de traction et un moteur de basculement.

(D'après document Sovel).

MT. Moteur de traction.
MB. Moteur de basculement.
IG. Interrupteur général.
RD. Résistance de démarrage.

3.3. — PERFORMANCES ET UTILISATIONS

Nous indiquerons à titre d'exemple, les caractéristiques de deux véhicules (1).

Véhicule A :

— Masse totale roulante : 8 700 kg ;

— charge utile et carrosserie : 4 000 kg ;

— vitesse en palier sur bon sol : 23 km/h ;

— consommation approximative moyenne : 650 Wh/km ;

— capacité nominale de la batterie ;

$$500 \text{ Ah} \times 96 \text{ V} = 48\,000 \text{ Wh} ;$$

— capacité utilisable :

$$48\,000 \times 0{,}8 = 38\,400 \text{ Wh} ;$$

— rayon d'action : environ 60 km.

Véhicule B :

— masse totale roulante : 18 000 kg ;

— charge utile et carrosserie : 11 500 kg ;

— vitesse en palier sur bon sol : 15 km/h ;

— consommation approximative moyenne : 1 300 Wh/km ;

— capacité nominale de la batterie :

$$500 \text{ Ah} \times 96 \text{ V} = 48\,000 \text{ Wh} ;$$

— capacité utilisable :

$$48\,000 \times 0{,}8 = 38\,400 \text{ Wh} ;$$

— rayon d'action : environ 30 km.

Par rapport aux véhicules à moteur thermique, il faut noter les différences suivantes :

— autonomie très limitée ;

— vitesse faible ;

— nécessité d'un service régulier pour obtenir un prix de revient satisfaisant ;

---

(1) Construits par Sovel.

— aptitude aux démarrages due au couple élevé des moteurs et à l'insensibilité à la température ambiante ;

— absence de consommation à l'arrêt (le fonctionnement au ralenti n'existe pas) ;

— absence de gaz d'échappements et d'odeurs ;

— silence de fonctionnement ;

— simplicité de conduite ;

— simplicité d'entretien ;

— entretien relativement indépendant de l'âge du véhicule ;

— possibilité d'alimenter très facilement des moteurs auxiliaires ;

— impossibilité de vol de carburant.

Il résulte de toutes ces caractéristiques que les camions électriques sont utilisés dans les cas suivants :

— transports urbains à arrêts fréquents : enlèvement des ordures ménagères, livraison et ramassage des colis de détail ;

— transports navettes sur courtes distances (cars pour aéroports) ;

— transports et manutention en atmosphère confinée ;

— manutentions spéciales (transport de poches de coulée) (*fig.* 107).

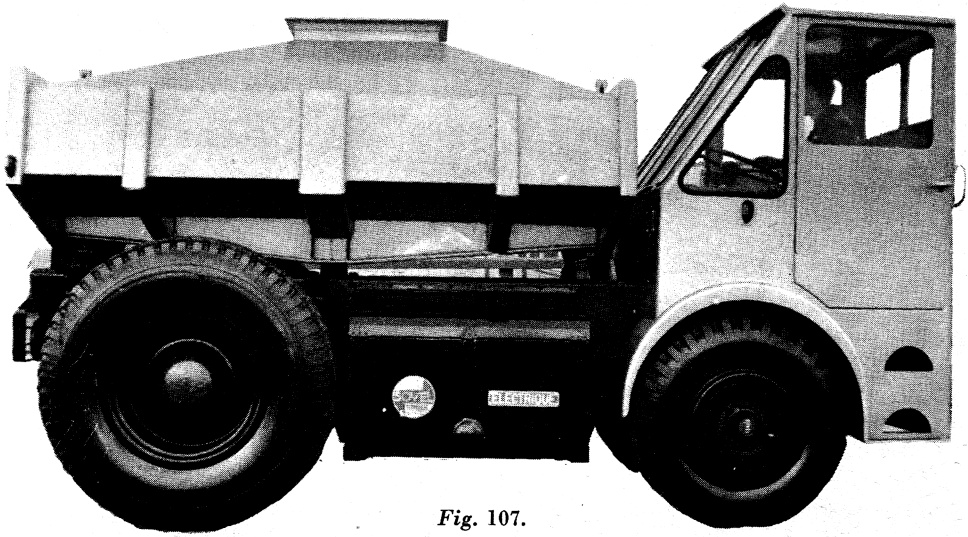


Fig. 107.

4. Chariots de manutention

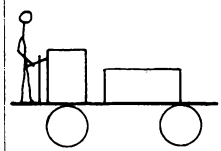
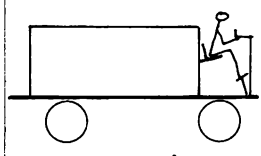
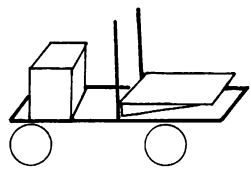
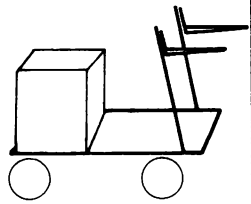
4.1. — ORGANISATION GÉNÉRALE

On désigne, sous cette appellation, des véhicules automoteurs, à encombrement aussi réduit que possible, pouvant déplacer des charges relativement élevées à des vitesses très réduites.

Le *tableau* V donne une classification des différents types de chariot, en fonction de l'utilisation normalement prévue. On constate un développement très net des chariots à fourches, au détriment des autres types.

Dans tous les cas, l'énergie nécessaire est fournie par une batterie d'accumulateurs.

TABLEAU V

Type	Capacité de transport	Allure générale	Utilisations
Porteur.	500 kg à 4 t.		Charge déposée sur une plate-forme.
Tracteur.	2 à 15 t.		Un ou deux moteurs sur modèles puissants. Toutes les roues peuvent être motrices.
Elévateur à plate-forme.	2 à 5 t. Hauteur de levée faible : 0,10 m. 2 à 5 t. Hauteur de levée de 1 à 3 m.		Les charges sont déposées à l'avance sur une plate-forme.
Elévateur à fourches.	1 à 5 t. Hauteur de levée jusqu'à 3 m.		Les charges sont déposées sur des plates-formes spéciales qui permettent le gerbage et la palettisation.

4.11. — CONCEPTION MÉCANIQUE

Nous indiquerons très sommairement les caractéristiques essentielles des organes mécaniques :

4.111. Châssis.

Il est obtenu par soudage d'éléments profilés et de tôles épaisses. Il doit être rigide et indéformable.

4.112. Transmission et direction.

En raison de la vitesse réduite de translation, une double réduction est généralement nécessaire entre le moteur et l'essieu.

Dans les plus petits modèles le mouvement est transmis à une roue unique montée sur pivots et qui assure à la fois les rôles de traction et de direction.

Les chariots plus puissants peuvent comporter 4, 6 ou 8 roues, généralement toutes directrices. Le mouvement est transmis aux roues motrices par joints de cardan, un différentiel est intercalé entre les roues motrices et la sortie du réducteur. Certains modèles sont dépourvus de différentiel et comportent un moteur sur chaque roue motrice.

Le freinage est obtenu par action de freins à mâchoires et tambours identiques à ceux utilisés en automobile. Ils agissent, soit sur les arbres à roues, soit sur l'arbre de première réduction. En raison des charges transportées et de la nécessité d'obtenir un arrêt très rapide, les freins des chariots sont extrêmement puissants. Un freinage électrique rhéostatique est quelquefois employé en complément des freins mécaniques.

4.113. Roues.

La faible vitesse de translation, la nécessité d'obtenir des rayons de braquage réduits, ont amené à l'utilisation de roues à faibles dimensions. Leur diamètre est généralement compris entre 200 et 500 mm. L'emploi de bandages pleins est préférable à celui des pneumatiques pour les raisons suivantes :

— *charge spécifique plus élevée pour les bandages* ;
— *difficultés de fabrication de pneumatiques susceptibles de supporter les charges* ;
— *résistance au roulement plus faible avec les bandages.*

4.114. Dispositifs élévateurs.

Le plus souvent on utilise des vérins hydrauliques pour toutes les commandes de mouvement : levage, pivotement, réglage de l'écartement des bras de la fourche. D'autres commandes peuvent être prévues sur les accessoires : pinces, bennes, treuils.

La mise en pression de l'huile est obtenue par un moteur auxiliaire entraînant une pompe, et la distribution s'effectue soit par électro-vannes, soit par tiroir.

4.115. Poste de conduite.

La conduite est assurée :

— *soit par un conducteur accompagnant qui circule à pied* : l'orientation des roues directrices est commandée par un timon sur lequel on dispose toutes les commandes. Le freinage est obtenu en abaissant ou en relevant le timon (*fig.* 108) ;

— *par un conducteur porté*, debout ou assis : les roues directrices sont alors commandées par un guidon ou un volant (*fig.* 109).

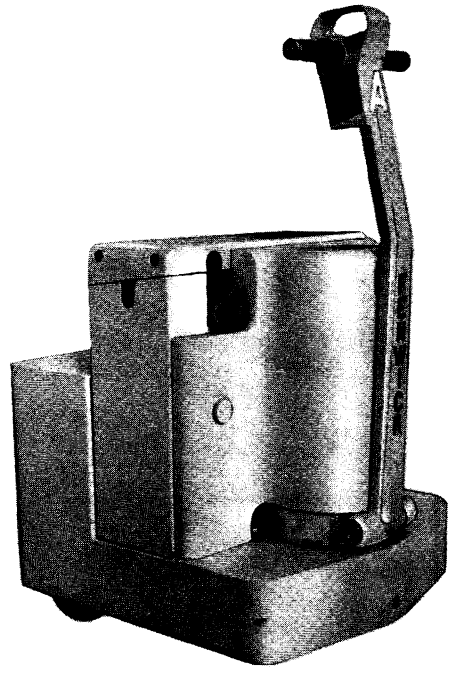


Fig. 108.
Chariot tracteur à commande par timon (Fenwick).

4.12. — ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE

4.121. Batterie d'accumulateurs.

La tension totale est comprise entre 12 et 48 V, c'est-à-dire à une valeur inférieure aux tensions dangereuses. Les capacités doivent être prévues pour un service journalier de 8 h, soit sans recharge, soit avec un biberonnage au milieu du service. Leur capacité varie, suivant les types de chariots, entre 130 et 800 Ah environ. Les batteries utilisent des éléments au plomb de construction spéciale (plaques épaisses, intervalles importants entre plaques) ou des éléments alcalins à positives tubulaires et négatives épaisses en fer fritté.

4.122. Moteur de traction.

Le moteur série est seul utilisé, en raison de ses qualités : aptitude au démarrage en charge, couple élevé. Il est généralement à 4 pôles et sa puissance varie de 1 à 10 kW environ. Il est construit avec les mêmes soins que les moteurs de traction puissants.

Le moteur de pompe à huile est généralement à excitation composée ; il entraîne une pompe à engrenages dont la pression de sortie est élevée (de 40 à 180 bars suivant les modèles).

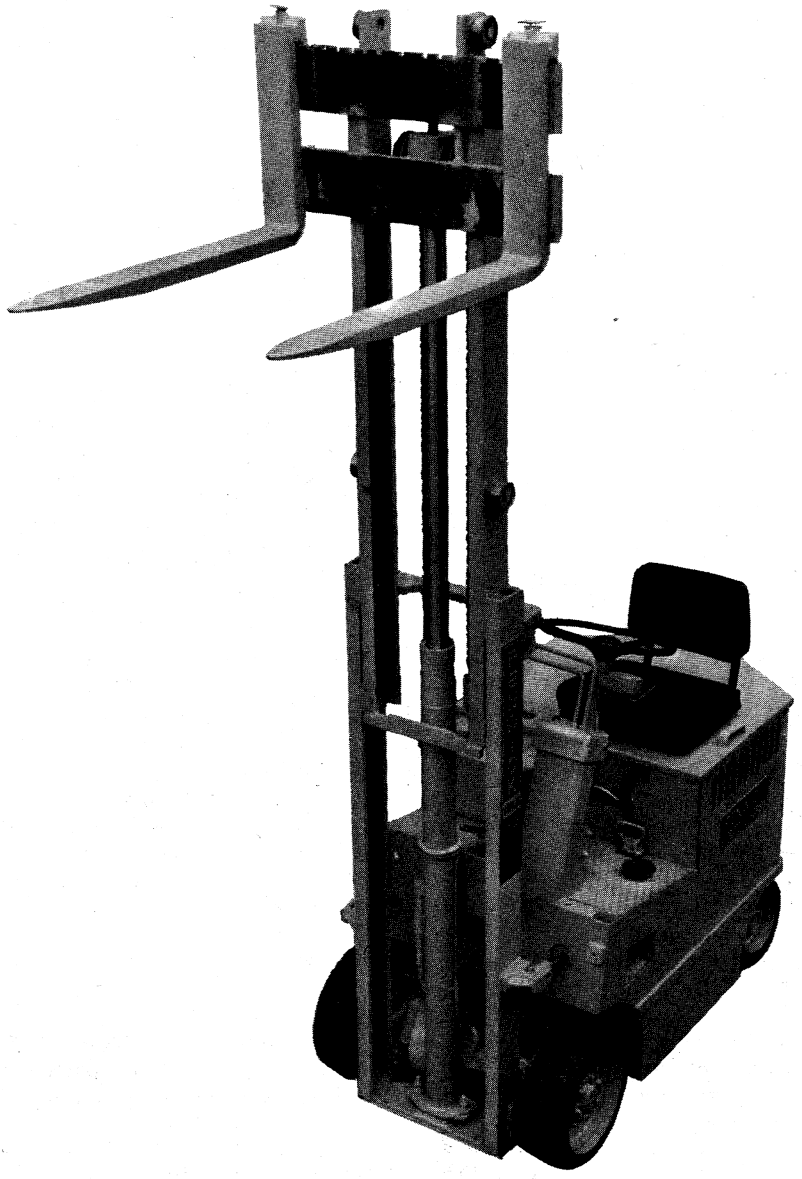


Fig. 109. — Chariot élévateur à fourche (Fenwick).

4.123. Equipement de démarrage et contrôle de la vitesse.

L'équipement associé au moteur de traction permet :

— le *démarrage par élimination de résistances* ;
— le *réglage de la vitesse*, soit par couplage des inducteurs en série parallèle, soit par insertion de résistances en série avec le moteur ;
— l'*inversion du sens de marche* ;
— plus rarement, l'*utilisation du moteur de traction* pour les opérations de levage (cas des chariots n'utilisant pas de circuit hydraulique).

La figure 110 indique le schéma d'un petit chariot électrique à bras.

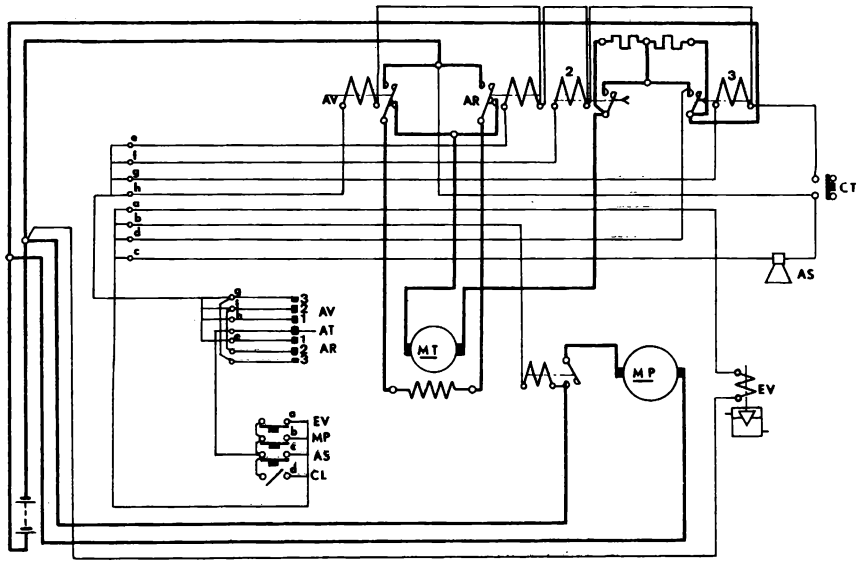


Fig. 110. — Schéma de câblage d'un chariot électrique à bras.

AT. Arrêt.
AV. Marche avant.
AR. Marche arrière.
1. Vitesse lente.
2. Vitesse moyenne.
3. Vitesse élevée.
CL. Clé de contact.
EV. Electro valve.
MP. Moteur de pompe.
MT. Moteur de traction.
AS. Avertisseur.

(D'après document Fenwick.)

En ce qui concerne le réglage de la vitesse, le couplage série parallèle des inducteurs est pratiquement abandonné au profit du réglage rhéostatique. Ce dernier procédé, malgré la diminution de rendement qui résulte de la consommation des résistances, présente l'avantage de ne pas exiger de coupure en charge et augmente la souplesse de fonctionnement. Les courants contrôlés sont importants (de l'ordre de 100 à 200 A) et leur coupure entraîne, dans le cas où l'on utilise des couplages d'inducteurs, une usure non négligeable de l'appareillage.

Les équipements modernes utilisent des contacteurs spéciaux prévus pour des intensités élevées et des tensions faibles. Sur les chariots à conducteur accompagnant, les contacteurs sont commandés par un petit commutateur placé dans le timon de direction. Sur les chariots à conducteur porté, le contrôle peut s'effectuer par un contrôleur à déplacement rectiligne commandé à la main ou au pied.

Sur des types anciens de chariots, on peut encore rencontrer des combinateurs rotatifs à tambour et doigts.

Le démarrage entièrement automatique est peu utilisé en raison de la complexité de l'appareillage. On le rencontre seulement sur des chariots de grande puissance soumis à un service très dur. Les différentes combinaisons sont obtenues par des relais temporisés.

Les équipements autorisent couramment trois vitesses avant et trois vitesses arrière.

4.13. — ÉQUIPEMENTS DIVERS

Des accessoires peuvent être adaptés sur les chariots afin de résoudre des problèmes particuliers de manutention : bélier pour transport de rouleaux, potence, benne pelleteuse, dispositifs de rotation pour renversement ou dépôt de la charge, pinces de formes diverses.

4.2. — PERFORMANCES ET UTILISATION DES CHARIOTS

Les vitesses de translation varient de 0,8 à 1 m/s, pour les chariots à conducteur accompagnant, à 2,5 m/s pour les chariots à conducteur porté. Les vitesses de levage sont de l'ordre de 5 à 10 m/mn en charge.

Le chariot électrique doit être considéré comme un engin de manutention et non comme un engin de transport ; son utilisation rationnelle interdit de lui faire parcourir plus de 100 à 150 m entre la prise et le dépôt de la charge. Par rapport aux autres engins de manutention, il présente des avantages considérables :

— *la puissance absorbée par le moteur s'adapte instantanément et automatiquement aux variations de charge.* Cette qualité permet au chariot

électrique d'assurer normalement des démarrages fréquents, des parcours de quelques mètres seulement, d'avoir des accélérations élevées, de ne rien consommer pendant de très courts arrêts, contrairement à un moteur thermique que l'on est obligé de laisser tourner au ralenti ;

— *absence de bruits, de gaz d'échappement, d'odeurs* ;

— *simplicité de la mécanique* : pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses, ce qui entraîne une grande simplicité de conduite ;

— *sécurité d'emploi* résultant de l'absence de combustible et de la faible tension de fonctionnement ;

— *possibilités d'adaptation d'accessoires variés.*

Tous ces avantages compensent très largement les servitudes résultant de la présence de la batterie d'accumulateurs et expliquent le développement considérable des chariots électriques.

4e PARTIE

LES GENERATEURS D'ELECTRICITE D'ORIGINE ELECTRO-CHIMIQUE

On range, sous cette dénomination, des générateurs d'électricité assurant la transformation directe de l'énergie chimique en énergie électrique. D'un point de vue très général, on peut distinguer :

— *les* piles primaires, *livrées stockées en état de fonctionnement, non rechargeables ;*

— *les* piles amorçables, *stockées dans un état ne permettant pas leur fonctionnement, et que l'on est obligé de compléter au moment de la mise en service ;*

— *les* piles secondaires ou accumulateurs rechargeables *après utilisation.*

Alors que les deux premiers types ne permettent d'assurer la fourniture d'énergie que pendant un seul cycle, en raison de transformations chimiques pratiquement irréversibles ou de difficultés de recharge, le troisième type permet, au contraire, d'assurer plusieurs cycles de fonctionnement, les transformations chimiques étant pratiquement réversibles et la recharge facile.

Nous remercions les constructeurs qui ont bien voulu nous communiquer des renseignements sur les piles et accumulateurs de leur fabrication : Accumulateurs Fulmen, Accumulateurs Tudor, S.A.F.T. ; S.O.G.E.A. ; C.I.P.E.L., La Pile Leclanché, Mallory Batteries, Wonder.

M. LAURENT, directeur technique de « La Pile Leclanché » et M. Rodolphe HEROLD de la S.A.F.T. ont bien voulu relire ce chapitre et nous indiquer des corrections et améliorations à apporter sur plusieurs points. Nous les en remercions vivement.

I. Rappel de notions théoriques

Un générateur électro-chimique fait intervenir des réactions dans un couple formé de corps ayant des potentiels différents et un électrolyte. Si l'on réunit par un conducteur, à l'extérieur de l'électrolyte, les deux électrodes du couple, les électrons issus de l'électrode négative ou anode passent à travers le conducteur et viennent sur l'électrode positive ou cathode sur laquelle se produit une réaction de réduction, tandis qu'une réaction d'oxydation a lieu sur l'électrode négative.

En général l'anode se dissout dans l'électrolyte en formant des ions positifs et en émettant des électrons ; par contre, la cathode absorbe ces électrons en se réduisant.

En circuit ouvert, chacune des électrodes est en équilibre avec l'électrolyte et prend un potentiel défini par rapport à celui-ci. La différence des deux potentiels d'électrode correspond à la force électro-motrice de la pile.

Il résulte des considérations précédentes que dans tout générateur électrochimique, la présence simultanée des trois phases suivantes est nécessaire pour qu'il y ait fourniture d'électrons :

— « *conducteur* » ou « *transporteur électronique* » qui assure le transport des électrons du circuit extérieur aux phases actives du couple ;

— *matière active* qui se transforme en fournissant l'énergie, c'est-à-dire des électrons à un certain potentiel ;

— *phase liquide* assurant le rôle de conducteur ionique entre anode et cathode.

Dans les accumulateurs, les réactions aux électrodes se traduisent, en général, par une transformation de la nature chimique des électrodes, sans qu'il y ait passage apparent en solution des espèces chimiques des matières actives. La recharge de l'accumulateur a pour but une transformation inverse, de façon à ramener les électrodes à leur état initial.

L'énergie électrique provenant des transformations chimiques, il s'en suit, généralement, par application du principe de conservation de l'énergie, que ces transformations sont exothermiques (1).

---

(1) Il est possible, sur le plan théorique, d'envisager des réactions endothermiques, conduisant à la fourniture d'énergie électrique.

Le *tableau I* indique les principaux couples utilisés avec quelques unes de leurs caractéristiques énergétiques.

TABLEAU I

Types	Définition du couple	Wh/kg	Wh/dm³	Temps de décharge T (1)	Wh/kg pour décharge en T/10	Prix de vente relatif	Stockage ou durée de vie	Utilisations
Piles primaires	MnO_2-Zn salin type Leclanché	90	160	50 h	45	1	Moyen.	*Applications militaires Éclairage portatif. Emetteurs et récepteurs de radio portatifs. Jouets. Horloges. Petits appareils ménagers ou d'applications diverses (« gadgets »).*
	MnO_2-Zn alcalin	130	320	10 h	80	3	Moyen.	— *d°* — *Partiellement rechargeable.*
	HgO-Zn alcalin	180	700	20 h	100	5	Bon.	*Appareils portatifs miniaturisés.*
	MnO_2-Mg salin	110	300					*Peu développé.*
	AgO-Zn alcalin	140	350	10 h	120	20	Bon.	*Applications militaires (missiles).*
	O_2-Zn salin	120	170	1000 h	faible	0,4	Bon.	*S.N.C.F. P et T. Signalisations de travaux publics. Balises.*
	O_2-Zn alcalin	270	240	4000 h	faible	0,2	Bon.	
Piles amorçables	AgCl-Mg eau de mer	200	600	10 mn	180	90	Très bon.	*Torpilles*
	CuCl-Mg eau de mer	80	150	30 mn	50	10	Moyen.	*Bouées.*
	AgO-Zn alcalin	80	150	10 mn	60	70	Très bon.	*Fusées.*
Piles secondaires ou accumulateurs	Fe-Ni Cd-Ni non étanche	35	80	5 h	10	10	3000 cycles	*Chariots électriques (Fe-Ni).*
	Cd-Ni étanche	35	95	5 h	30	30	3000 cycles.	*Cd-Ni. Toutes utilisations nécessitant de l'énergie portable. (Aviation : Cd-Ni étanche).*
	AgO-Zn	115	240	10 h	90	40	100 cycles.	*Appareils portatifs. Fusées.*
	PbO_2-Pb	25	80	10 h	15	2,5	1000 cycles.	*Démarrage de moteurs thermiques, Chariots électriques.*

(1) Ce temps T correspond aux performances optimales.

1.1. — PHÉNOMÈNES DE POLARISATION

On constate, parfois, lorsqu'un générateur débite un courant important dans un circuit extérieur de résistance fixe, que ce courant décroît plus ou moins rapidement en fonction du temps, au point d'atteindre des valeurs très faibles, pratiquement inutilisables. Ce phénomène provient de la polarisation d'une ou des deux électrodes.

La polarisation d'une électrode sous débit provient de plusieurs phénomènes :

— *concentration à l'électrode* des produits de réaction ;

— *vitesse de réaction* des matières actives insuffisante pour assurer le débit d'électrons demandé ;

— *vitesse de diffusion* des espèces chimiques dans l'électrolyte insuffisante ;

— *formation sur les électrodes* de composés insolubles isolants ;

— *accroissement de la conductivité* de la phase conductrice d'électrons.

1.2. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

1.21. — FORCE ÉLECTROMOTRICE

Elle ne dépend que de la nature du couple utilisé ; les dimensions des électrodes sont sans influence. Pour les besoins pratiques, on substitue souvent à la notion de f.é.m., celle de tension aux bornes faisant intervenir la résistance interne et le courant débité. La tension nominale est une valeur conventionnelle qui correspond sensiblement aux valeurs moyennes relevées sur des générateurs au début de leur mise en service dans des conditions courantes d'utilisation.

1.22. — CAPACITÉ

Cette grandeur définit la quantité d'électricité susceptible d'être fournie par un générateur. Elle dépend essentiellement des quantités de matière mises en jeu.

Afin de juger de la qualité des différents générateurs, on utilise souvent les notions de capacité massique ou capacité volumique qui représentent la capacité rapportée à l'unité de masse ou l'unité de volume.

1.23. — ÉNERGIE

Comme la capacité, elle dépend également des dimensions du générateur ; on utilise également les notions d'énergie massique et d'énergie volumique.

1.24. — RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT

Le comportement d'un générateur électrochimique dépend d'un certain nombre de facteurs : résistance du circuit extérieur, temps de débit, temps de repos... On comprend alors la nécessité de définir des régimes-types si on veut apprécier la qualité d'un générateur. Les différents régimes seront définis dans un chapitre ultérieur pour chaque type de pile ou d'accumulateur.

1.25. — RENDEMENT

Cette grandeur est surtout utilisée pour les accumulateurs ; on définit alors :

— le *rendement en énergie*, égal au rapport de l'énergie restituée à la décharge à l'énergie absorbée à la charge ;

— le *rendement en quantité d'électricité*, égal au rapport de la quantité d'électricité restituée à la décharge à la quantité d'électricité absorbée à la charge.

Il varie dans des proportions considérables suivant le régime de décharge et de charge.

Bien que très rarement employé, on peut également définir le rendement électrochimique d'un générateur par le rapport de la quantité d'électricité (ou énergie recueillie à la décharge) à la quantité d'électricité (ou énergie) mise en jeu théoriquement dans les réactions intéressant la totalité des matières actives.

1.26. — AUTRES CARACTÉRISTIQUES

La résistance interne et la puissance mise en jeu se définissent comme dans tout circuit électrique.

L'impédance d'un générateur électrochimique est complexe. On l'assimile à un circuit composé de condensateurs et de résistances en série et en parallèle et il peut se décomposer simplement en une impédance capacitive et une résistance pure montées en série.

2. Piles primaires [1]

Seuls les couples les plus utilisés seront étudiés, au moins sommairement.

2.1. — PILE DU TYPE LECLANCHÉ

Mise au point par Georges Leclanché en 1866, cette pile utilise le couple MnO_2-Zn en milieu salin. C'est, de loin, l'élément le plus utilisé dans les applications les plus diverses (2).

2.11. — CONSTITUTION (*fig.* 1)

2.111. Electrode négative.

Constituée par du zinc amalgamé en surface (proportion de mercure de l'ordre de 0,5 %), elle a la forme d'un godet cylindrique et sert de réservoir. L'amalga-

---

(1) Du point de vue normalisation, les piles font l'objet des recommandations 86-1, 86-2, 86-3 de la Commission Electrotechnique Internationale et des normes U.T.E. NF C 59-100, 59-101, 59-200, 59-201, 59-202, 59-203. D'après les termes de ces publications, la désignation des piles s'effectue de la façon suivante :

— pour les éléments MnO_2-NH_4Cl-Zn : une lettre indique le forme de l'élément (R : cylindrique. F : plat. S : parallélépipédique), un nombre caractérise les dimensions de l'élément ;

— pour les autres éléments : une lettre indique le système électro-chimique (A : oxygène de l'air-sel ammoniac-zinc. M : oxyde de mercure-électrolyte alcalin-zinc. S : oxyde d'argent-électrolyte alcalin-zinc. L : bioxyde de manganèse-électrolyte alcalin-zinc). Une seconde lettre indique la forme de l'élément. Un nombre caractérise la taille de l'élément.

Pour les piles comportant plusieurs éléments en série, le nombre d'éléments précède les symboles précédents.

Il faut regretter que les constructeurs, tout en fabriquant des piles conformes à ces recommandations, n'aient pas adopté, en général, ces désignations.

(2) Le terme « pile Leclanché » désigne le couple MnO_2-NH_4Cl-Zn. C'est aussi la raison sociale retenue par un important constructeur français de piles.

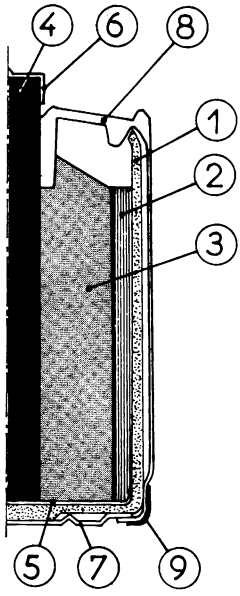


Fig. 1.

1. Réservoir en zinc (anode).
2. Gel électrolytique.
3. Cathode.
4. Charbon conducteur.
5. Carton isolant.
6. Capsule.
7. Rondelle de contact.
8. Gaine d'étanchéité plastique.
9. Coupelle de serrage.

(Document « La Pile Leclanché ».)

mage ainsi que des traces de plomb et de calcium évitent la corrosion à circuit ouvert et permettent sa conservation.

2.112. Electrode positive.

Contrairement à une opinion assez répandue, le crayon de charbon n'est pas l'électrode positive ; il assure simplement un rôle de conduction. C'est le bioxyde de manganèse qui constitue l'électrode positive. Comme il est peu conducteur, il est mélangé à de la suie, généralement du noir d'acétylène, afin d'obtenir une conductivité convenable.

Le bioxyde de manganèse peut être naturel, mais on lui préfère, malgré un prix plus élevé, des bioxydes activés par traitement chimique ou électrolytique. Les performances sont améliorées pour les forts débits. Plusieurs structures cristallines sont possibles ; la structure gamma est la plus intéressante.

2.113. Electrolyte.

L'élément actif est une solution aqueuse de chlorure d'ammonium NH_4Cl et de chlorure de zinc $ZnCl_2$, dont le *p*H varie entre 5 et 5,5. Il n'est pas utilisé sous la forme liquide, mais immobilisé sous forme de gel par mélange avec de l'amidon et de la farine. Le plus souvent la prise s'opère à froid, en présence de cations multivalents (cation Zn^{++} provenant de $ZnCl_2$ mélangé au chlorure d'ammonium) ; plus rarement la prise est obtenue par cuisson. Pour certaines piles, le gel est déposé sur une feuille de papier kraft, et après séchage aux rayons infrarouges, la feuille est enroulée sur elle-même et forme un cylindre à l'intérieur duquel est glissée la matière active.

Pour obtenir des tensions élevées, une disposition différente est employée (*fig.* 2). Des éléments cylindriques peuvent être également associés dans une même enveloppe et montés en série (exemple : pile plate de 4,5 V connue de tout le monde).

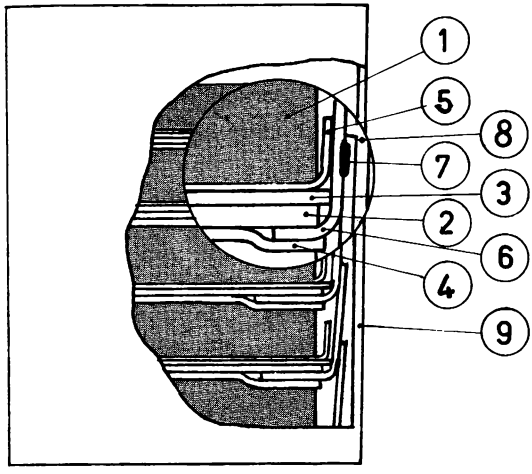


Fig. 2.

1. Cathode au bioxyde de manganèse.
2. Anode de zinc.
3. Séparateur papier et gel.
4. Plaquette de plastique conducteur.
5. Séparateur papier.
6. Coupelle en chlorure de polyvinyle.
7. Soudure haute fréquence.
8. Cire microcristalline.
9. Bac métallique.

(Document « La Pile Leclanché ».)

2.12. — FONCTIONNEMENT

2.121. Anode.

On appelle anode, dans un générateur électrochimique, l'électrode qui est le siège des phénomènes d'oxydation par expulsion d'électrons ; selon cette terminologie, cette électrode se dissout en fonctionnement et fournit des électrons au circuit extérieur. Son potentiel est donc négatif par rapport à l'autre électrode.

Le zinc passe en solution dans l'électrolyte et libère deux électrons dans le circuit extérieur ; les ions Zn^{++} déplacent dans l'électrolyte les ions hydrogène.

2.122. Cathode.

On appelle cathode, l'électrode qui est le siège des phénomènes de réduction par absorption d'électrons. Le bioxyde de manganèse (MnO_2) de la cathode se réduit sous forme de groutite (MnOOH) ou d'hétaérolite (Mn_2O_3ZnO) sous l'action des protons H^+.

L'ensemble des réactions peut se représenter de la façon suivante :

anode : $Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e.$

électrolyte : $Zn^{++} + H_2O \rightarrow ZnO + 2H^+.$

$Zn^{++} + 2NH_4Cl \rightarrow ZnCl_2\,(NH_3)_2 + 2H^+.$

cathode : $2e + 2MnO_2 + 2H^+ \rightarrow 2MnOOH$

$2e + 2MnO_2 + Zn^{++} \rightarrow Mn_2O_3ZnO.$

Le chlorure de zinc de l'électrolyte permet, par action tampon, de maintenir constant le *p*H de la cathode.

Pendant le repos, les caractéristiques électriques de la pile remontent ; ce phénomène est dû à une diffusion des produits de réaction de l'électrolyte et à une homogénéisation de la réduction de la cathode.

2.13. — FORCE ÉLECTROMOTRICE ET TENSION AUX BORNES

Le potentiel du zinc étant fixe, la force électromotrice dépend essentiellement du potentiel du bioxyde de manganèse : ce potentiel varie avec le *p*H, le degré d'oxydation et la structure cristalline. En pratique, la f.é.m. varie entre 1,60 et 1,70 V.

La tension aux bornes est variable avec la résistance interne, le débit, la durée du débit. Sa valeur nominale, pour un élément neuf, est fixée à 1,5 V. Dans les applications pratiques, la tension d'arrêt est prise égale, suivant les applications, à 1,1, 0,9, 0,7 V.

2.14. — CONSERVATION

Contrairement à certains slogans publicitaires, une pile s'use à circuit ouvert. Dans le cas de la pile de type Leclanché, cette usure se traduit par une diminution de la capacité de l'ordre de 20 % par an et une baisse de la f.é.m. de l'ordre de 15 % par an. Cette usure à circuit ouvert est attribuée à des corrosions internes sous l'effet de petits couples apparaissant entre des impuretés et les éléments actifs, et à l'instabilité des produits chimiques.

2.15. — COULAGE DES PILES

Au cours du fonctionnement, le zinc passe en solution dans l'électrolyte. La solvatation des ions zinc se fait au détriment de l'eau contenue dans la masse dépolarisante qui s'assèche. Le gel électrolytique se dilue et il en résulte un écoulement du liquide hors de la pile. Ce liquide riche en chlorure de zinc est très corrosif et il en résulte des risques de détérioration des circuits ou ensembles associés à la pile. On conçoit donc l'intérêt des piles étanches ; l'étanchéité a été obtenue avec plus ou moins de succès par certains constructeurs. Il est bon toutefois de savoir qu'on peut fabriquer et qu'il existe des piles réellement étanches.

2.2. — PILE AU MERCURE

Mise au point entre 1940 et 1945, pour des besoins militaires, elle utilise le couple zinc-oxyde mercurique et un électrolyte alcalin à base de potasse.

2.21. — FONCTIONNEMENT

Les deux électrodes étant reliées à un circuit extérieur, le zinc passe dans l'électrolyte en libérant deux électrons dans le circuit extérieur ; il s'oxyde tandis que l'oxyde de mercure se réduit en mercure, suivant les réactions :

$$HgO + H_2O + 2e \rightarrow Hg + 2OH^-$$

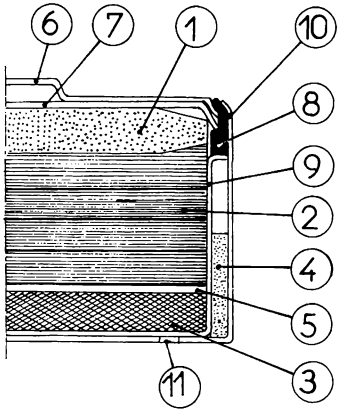
$$Zn + 2OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 + 2e$$

2.22. — CONSTITUTION

La figure 3 montre la disposition des éléments internes de la pile.

L'électrode négative se présente sous la forme d'une feuille laminée ou d'une poudre comprimée de zinc amalgamé.

L'électrode positive est à base d'oxyde de mercure HgO. Afin d'augmenter sa conductivité, on lui ajoute 10 à 15 % de graphite très divisé.



(Document Mallory.)

Fig. 3. — Pile à l'oxyde mercurique.

1. Anode en zinc.
2. Electrolyte contenu dans un matériau absorbant.
3. Cathode en oxyde mercurique.
4. Manchon absorbant.
5. Séparateur.
6. Couvercle extérieur en acier.
7. Couvercle intérieur en acier étamé.
8. Joint d'étanchéité isolant.
9. Boîtier intérieur en acier.
10. Boîtier extérieur en acier nickelé.
11. Orifice d'évacuation et d'aération.

L'électrolyte constitué par un mélange de potasse et de zincate de potasse en solution aqueuse est fixé dans un matériau absorbant.

2.23. — CARACTÉRISTIQUES

La f.é.m. est de l'ordre de 1,35 V ; la tension aux bornes, pour un circuit extérieur d'une résistance donnée, se maintient constante dans le temps (*fig* 4). Par rapport à la pile Leclanché, la pile zinc-mercure offre l'avantage d'une conservation plus longue et d'une énergie volumique très supérieure.

La capacité volumique élevée des matériaux utilisés a permis la construction de piles miniatures, tandis que la constance de la tension est appréciée dans les applications où la pile doit débiter en permanence. En général, pour des éléments de même volume, la pile au mercure fournit une énergie égale à cinq fois celle de l'élément Leclanché.

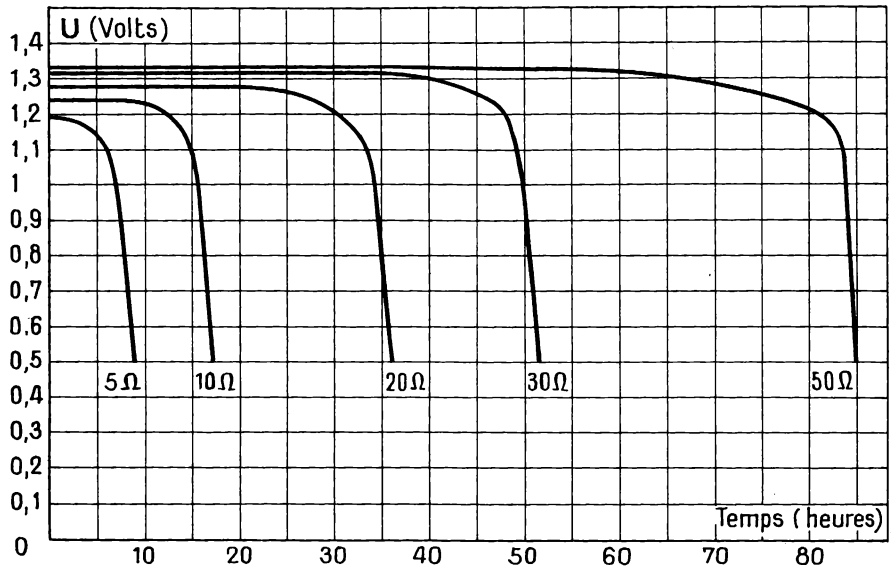


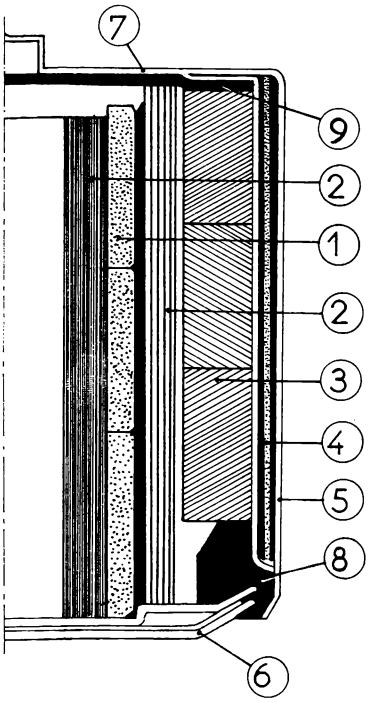
Fig. 4.

2.3. — PILES ALCALINES ZINC-MANGANÈSE

Le couple utilisé est le même que dans la pile Leclanché, mais l'électrolyte alcalin est à base de potasse, immobilisée dans un gel.

L'électrode négative, placée au centre de la pile, est à base de zinc en poudre en suspension dans un gel.

L'électrode positive est formée de bioxyde de manganèse et de particules de graphite ; elle se présente sous la forme de cylindres entourant le gel électrolytique (*fig.* 5).



(Document Mallory.)

Du point de vue chimique, les réactions peuvent se représenter de la façon suivante :

A l'anode :

$$Zn + 2\ OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 + 2e$$

A la cathode :

$$2MnO_2 + H_2O + 2e \rightarrow Mn_2O_3 + 2\ OH^-$$

On peut représenter globalement les réactions :

$$Zn + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + Mn_2O_3$$

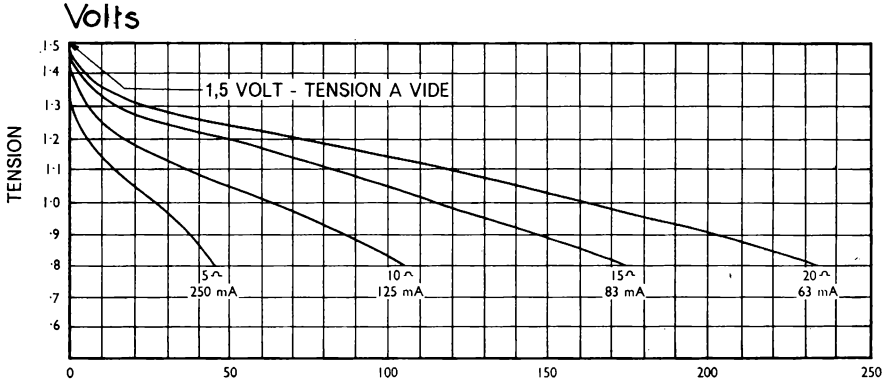
$$\downarrow \quad \uparrow$$

$$Zn \quad O + H_2O$$

Fig. 5.

1. Anode.
2. Matériau absorbant.
3. Cathode.
4. Manchon absorbant.
5. Boîtier extérieur.
6. Couvercle inférieur et borne négative.
7. Borne positive.
8. Joint d'étanchéité.
9. Entretoise isolante.

La f.é.m. est de l'ordre de 1,5 V. Les variations de la tension dans le temps sont représentés sur la *figure* 5 *bis*.



(Document Mallory.)

Fig. 5 *bis.*

Courbe de décharge d'une pile alcaline au manganèse élément LR 20.

Par rapport à la pile saline Leclanché, on peut noter les différences suivantes :

— impédance interne plus faible, autorisant des courants de pointe plus importants ;

— influence moindre des variations de débit sur la capacité utilisable ;

— énergie volumique plus élevée ;

— difficultés plus grandes pour obtenir une étanchéité convenable, tenant à l'emploi de la potasse comme électrolyte ;

— prix de revient plus élevé à énergie égale ;

— conservation dans le temps sensiblement identique.

2.4. — PILES A DÉPOLARISATION PAR L'AIR

Ces piles sont exclusivement utilisées pour les applications industrielles. L'électrolyte peut être alcalin (NaOH) ou salin (NH_4Cl).

◆ **Pile à électrolyte alcalin.**

L'électrode négative est en zinc amalgamé ; afin d'obtenir une grande surface de contact avec l'électrolyse, elle est réalisée en plusieurs parties reliées électriquement.

L'électrolyte est une solution de soude. Suivant les conditions d'utilisation, l'électrolyte peut être soit immobilisé, soit libre. Dans ce dernier cas, la pile est livrée sèche et il est nécessaire de l'amorcer avant la mise en service.

L'électrode positive, du point de vue électro-chimiquement actif, est l'oxygène de l'air, mais elle est constituée par une électrode à base de charbon actif conducteur, poreux mais imperméable à la solution électrolytique.

Le fonctionnement fait intervenir une théorie très complexe, mais on peut toutefois admettre les principales réactions schématisées suivantes :

$$Zn + 2OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 + 2e$$
$$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$$
$$Zn + O \rightarrow ZnO$$

ou globalement en faisant intervenir la soude :

$$Zn + O + 2NaOH \rightarrow Zn(ONa)_2 + H_2O$$
$$Zn(ONa)_2 + H_2O \rightarrow ZnO + 2NaOH$$

Du point de vue électrique, ces piles présentent les caractéristiques suivantes :

— f.é.m. de 1,45 V ;

— d.d.p. constante dans le temps (*fig.* 6) ;

— régime de décharge admissible faible ;

— perte de capacité au bout d'un an inférieure à 10 %.

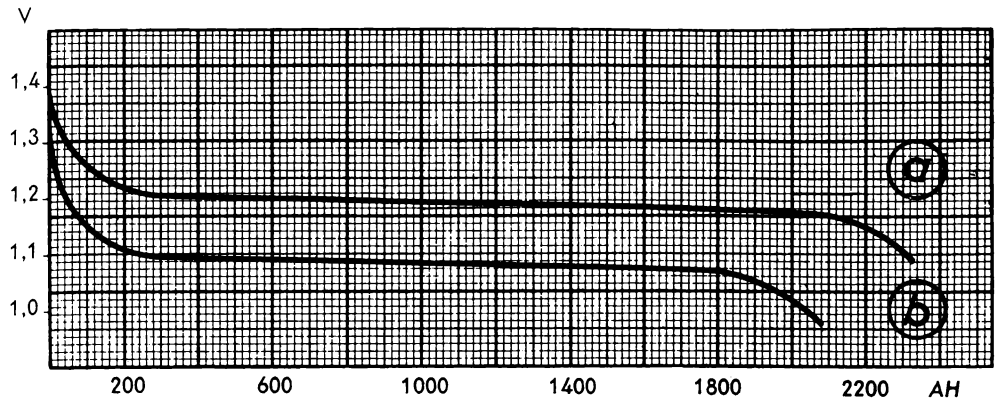


Fig. 6. — *a.* Courant débité 0,4 A. *(Document CIPEL.)*
b. Courant débité 1 A.

Elles sont utilisées pour des applications demandant des débits prolongés et peu importants : signalisation ferroviaire, petits standards téléphoniques, circuits radio basse tension, stations de guidage radioélectrique.

◆ **Pile à électrolyte salin** (*fig.* 7).

L'électrode négative en zinc amalgamé est immergée complètement dans l'électrolyte à base de chlorure d'ammonium et de chlorure de zinc.

L'électrode positive est constituée par un mélange de graphite et de charbon actif devant permettre la pénétration de l'oxygène de l'air jusqu'à l'électrolyte. tout en s'opposant à la pénétration de l'électrolyte.

Le fonctionnement fait intervenir les réactions suivantes :

$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e$

$Zn^{++} + H_2O \rightarrow 2H^+ + ZnO$

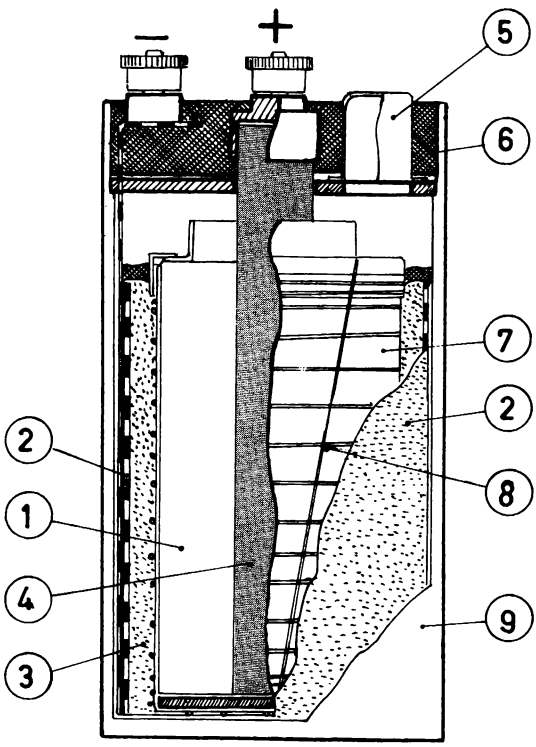
$Zn^{++} + 2NH_4Cl \rightarrow ZnCl_2\,(NH_3)_2 + 2H^+$

$O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O.$

La f.é.m. est de 1,45 V et la différence de potentiel aux bornes est relativement constante dans le temps (*fig.* 8).

La conservation est bonne, la perte de capacité après un an est inférieure à 10 %.

Les applications sont relatives à la signalisation ferroviaire, la téléphonie, les circuits d'alarme et de sécurité, les sonneries, les gâches électriques, les clôtures électriques pour parcs à bestiaux, la distribution de l'heure.



(Document Leclanché.)

Fig. 7.

1. Cathode.
2. Anode.
3. Electrolyte.
4. Electrode en charbon.
5. Capsule.
6. Brai de fermeture.
7. Papier.
8. Frettage.
9. Bac extérieur.

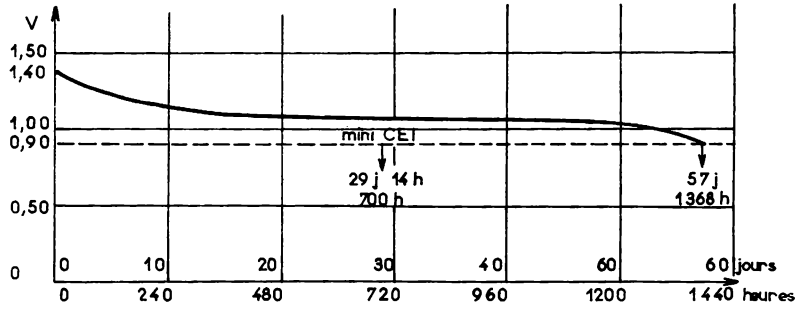


Fig. 8. — Décharge sur 5,5 V, type S 10-604.

(Document Leclanché.)

3. Piles amorçables

Dans ces piles, l'électrolyte (salin ou alcalin) est incorporé au moment de l'emploi. Leur utilisation étant limitée à des cas très spéciaux, nous n'en donnerons qu'un aperçu très sommaire.

3.1. — PILE AU CHLORURE D'ARGENT-MAGNÉSIUM

L'électrode négative est une plaque d'un alliage à base de magnésium, doublée, sur la face devant rester inactive du point de vue électrochimique, d'une feuille d'argent ultra-mince. L'électrode positive est une plaque d'argent recouverte de chlorure d'argent. Un écartement convenable entre anode et cathode est assuré par des séparateurs (billes de verre serties dans la cathode). La f.é.m. d'un élément est de l'ordre de 1,5 V. On obtient des batteries à plus haute tension en empilant le nombre d'éléments nécessaires. Une feuille d'argent mince, intercalée entre l'anode d'un élément et la cathode de l'élément suivant, joue un rôle de conducteur électronique.

A l'état sec, cette pile se conserve indéfiniment. La mise en service s'effectue par immersion dans l'eau de mer ou par remplissage d'eau salée. Certains modèles peuvent s'amorcer en eau douce. Son fonctionnement est excellent aux basses températures et sa tension se maintient constante jusqu'à la fin de la décharge. Son temps de décharge très court permet de l'utiliser dans la propulsion des torpilles navales. D'autres modèles sont prévus pour des décharges plus lentes (de 5 à 30 h) et sont utilisés sur les engins de sauvetage en mer.

Les réactions sont les suivantes :

$$Mg \rightarrow Mg^{++} + 2e$$
$$AgCl + e \rightarrow Ag + Cl^{-}$$
$$Mg^{++} + 2Cl^{-} \rightarrow MgCl_2$$

Certaines piles sont susceptibles de débiter des courants de l'ordre du millier d'ampères sous une tension de quelques centaines de volts.

3.2. — PILE AU CHLORURE CUIVREUX-MAGNÉSIUM

Cet élément fonctionne également à l'eau de mer et est utilisé pour l'alimentation des bouées. En raison de l'utilisation du chlorure cuivreux, la conservation est moins bonne que celle des autres piles amorçables, lorsque l'enceinte de la pile n'est pas étanche.

3.3. — PILE A L'OXYDE D'ARGENT-ZINC

Elle utilise un électrolyte alcalin : solution de potasse à 40 %. Sa conservation à l'état sec est très bonne mais, à l'état amorcé, elle ne dépasse guère 3 à 6 jours.

La f.é.m. est comprise entre 1,84 et 1,89 V. La décharge s'effectue dans un temps très court, à des régimes élevés pouvant atteindre 8 C en régime permanent et 15 C en pointe.

Au régime 8 C, la chute de tension interne est de l'ordre de 25 à 30 %.

Ce type de pile est utilisé pour l'équipement de fusées et engins spéciaux.

Pendant le fonctionnement, on observe les réactions suivantes :

$$Zn + 2\ OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 + 2e$$
$$2e + AgO + H_2O \rightarrow Ag + ZOH^-$$

Il existe également des piles amorcées utilisant le couple AgO-Zn. Elles sont employées dans les applications demandant des piles miniatures, notamment pour les montres électriques.

4. Choix d'une pile

Quels que soient sa constitution et son principe de fonctionnement, la pile choisie par l'usager doit satisfaire au service qu'il en attend. La qualité de ce service peut être jugée d'après les critères suivants :

— performances ;
— conservation ;
— étanchéité ;
— fiabilité (1).

4.1. — PERFORMANCES

On peut juger des performances d'une pile, soit en fonction de sa capacité, soit en fonction de l'énergie, mais ces deux grandeurs ne suffisent pas à déterminer entièrement la qualité de la pile. En effet, les derniers ampères-heures ou watts-heures sont fournis sous une tension plus basse qu'au début de la décharge. Dans une pile idéale, la tension resterait constante jusqu'à épuisement. Par ailleurs, les performances d'une pile peuvent varier d'une façon considérable suivant le temps de décharge, la résistance du circuit, les temps de repos éventuel entre deux mises en service consécutives.

Il est donc indispensable, si l'on veut comparer des piles, de fixer les différents paramètres intervenant dans les utilisations normales : résistance du circuit, temps de repos, temps de débit, tension d'arrêt... Par exemple, une pile destinée à une signalisation de chantier doit assurer un débit ininterrompu pendant plusieurs heures, alors qu'une pile de lampe portative miniature ne débite quelquefois que le temps nécessaire à l'éclairage d'un trou de serrure ou tout au plus à la montée d'un escalier.

La publication 86-2 de la Commission Electrotechnique Internationale a prévu différents services dont quelques-uns sont indiqués dans le *tableau II*.

---

(1) Etymologiquement : dérivé de fiable, archaïsme français signifiant : digne de foi, à qui l'on peut se fier.

Les *figures* 9 et 10 indiquent les variations de la tension aux bornes pour un type de piles, dans des conditions définies par la norme.

Les régimes les plus couramment utilisés par les fabricants de piles sont les suivants :

— *résistance de décharge :* 5 Ω *par élément* ; débit pendant 5 ou 30 mn par jour, 5 jours par semaine ;

— *résistance de décharge :* 40 Ω *par élément* ; débit pendant 4 h par jour, 5 jours par semaine.

Les tensions d'arrêt sont égales à 0,75 V pour l'éclairage, et 0,9 V pour l'alimentation des circuits à transistors.

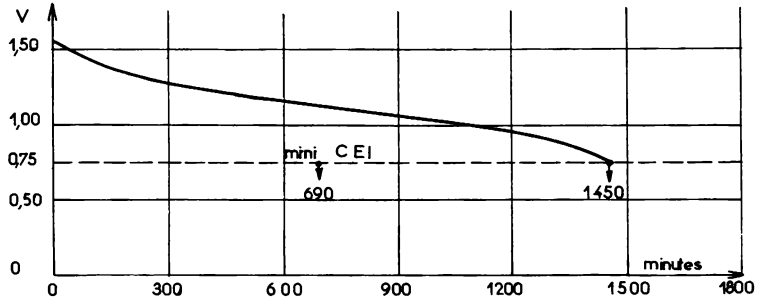


Fig. 9.

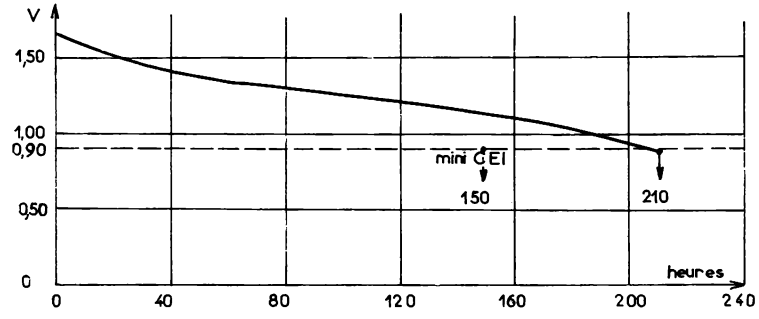


Fig. 10.

Fig. 9. — Courbe de décharge de pile type R 20 Leclanché en régime éclairage.

Fig. 10. — Courbe de décharge de pile type R 20 Leclanché en régime transistor.

(Document Leclanché.)

TABLEAU II (*D'après publication 86-2 de la C.E.I.*).

Usage	Résistance de décharge en Ω par élément en série	Cycle de décharge	Tension d'arrêt en V	Durée minimale de décharge pour une pile		
				type	dimensions en mm (1)	durée
Eclairage portatif.	5	30 mn par jour, 5 jours consécutifs par semaine.	0,75	R 20	34-61,5	11 h 30
Usages industriels.	10	Décharge continue.	0,85			350 h
	2,66	2 périodes d'une heure par jour, pendant 7 jours par semaine, comme suit : 1 h de décharge, 6 h de repos ; 1 h de décharge, 16 h de repos.	0,85	R 40	67-172	65 h
Piles radio pour appareils à tubes.	5	4 h par jour, 5 jours par semaine.	1	R 25-4	67-67-102	90 h
	150	4 h par jour, 5 jours par semaine.	0,9	30R20	210-84-187	540 h
Piles radio pour appareils à transistors.	40	4 h par jour, 5 jours par semaine.	0,9	R 20		140 h
Correction auditive. Appareils à tubes.	6 000	12 h par jour, 7 jours par semaine.	1	10F15	16-15-35	200 h
Correction auditive. Appareils à transistors.	625	12 h par jour, 7 jours par semaine.	0,9	MR 08	11,6-3,5	30 h
Appareils à lampe éclair.	3 000	12 h par jour, 7 jours par semaine.	1	15F20	27-16-51	200 h
	1	15 s par mn, 1 h par jour, 7 jours par semaine.	0,75	R 20	34-61,5	540 cycles

(1) Les dimensions sont indiquées dans l'ordre suivant : diamètre, hauteur, ou : longueur, largeur, hauteur.

4.2. — CONSERVATION

Nous avons déjà signalé l'aptitude des différentes piles à la conservation. D'une façon générale, une conservation prolongée n'est concevable qu'avec des piles amorçables à l'état sec ; bien que la garantie de conservation donnée par les constructeurs soit limitée à quelques années, on peut, en pratique, conserver ces piles indéfiniment. A l'état amorcé, elles doivent être utilisées dans un délai de quelques jours, voire de quelques heures.

Dans les piles de fabrication traditionnelle, livrées prêtes à l'emploi, la conservation est liée à plusieurs facteurs :

— *courts-circuits internes* provoqués par la présence de particules conductrices entre le zinc et l'aggloméré ; ils sont facilement détectables en fabrication par mesure de la f.é.m. et de la tension pour certaines conditions de débit ;

— *fonctionnement interne* dû à l'instabilité des produits employés. Les réactions chimiques entre l'anode et l'électrolyte ont lieu même lorsque la pile ne débite aucun courant. Cette usure à circuit ouvert dépend surtout du degré de pureté du métal et des conditions de température ;

— *dessèchement de l'électrolyte*, qui crée une augmentation de la résistance interne.

La durée de magasinage des piles avant les essais, définis par les normes, est comprise entre 3 et 12 mois suivant les types de piles. La capacité doit être alors égale au moins à 80 % des valeurs exigées pour les piles ayant moins d'un mois de stockage. En réalité, les fabricants obtiennent généralement des performances supérieures (*fig.* 8, 9, 10).

Il est conseillé de stocker les piles à basse température, en réfrigérateur par exemple (1).

4.3. — ÉTANCHÉITÉ

Les piles sont généralement associées à des ensembles sensibles aux produits chimiques entrant dans la composition de la pile. Un écoulement a toujours des effets néfastes sur les éléments voisins : corrosion, courts-circuits, grippage. Par ailleurs, le prix de l'appareil est généralement très supérieur à

(1) L'armée américaine stocke ses piles à la température de — 18 °C.

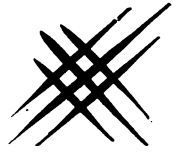
celui des piles qui l'alimentent, et on comprend alors tout l'intérêt de piles vraiment étanches, même si leur prix est légèrement plus élevé que celui des piles non étanches.

L'étanchéité totale d'une pile est très difficile à obtenir. La *figure* 1 indique la coupe d'une pile dont l'étanchéité est assurée dans la grande majorité des cas. Actuellement, aucun essai d'étanchéité n'a été défini par les normes, si bien que les mentions « étanche », « leak-proof » « 100 % étanche », portées sur les enveloppes n'ont pas toujours une signification rigoureuse. Indiquons toutefois un essai très simple qui permet de s'assurer de l'étanchéité : il consiste à mettre une pile en court circuit d'une manière permanente et à observer les fuites éventuelles ; encore faut-il sacrifier un nombre de piles tel que l'essai soit statistiquement valable.

Une bonne précaution consiste à enlever les piles des appareils qui sont mis au repos ou abandonnés pour quelque temps.

4.4. — FIABILITÉ

Cette qualité indique la confiance que l'on peut avoir dans un élément. Elle ne peut être obtenue que par un contrôle minutieux portant à la fois sur les matières premières et sur les différents stades de fabrication. Aucun essai n'est prévu par les normes et l'usager en est pratiquement réduit à rechercher la réputation et le sérieux des fabrications.



5. Accumulateurs

5.1. — ACCUMULATEURS AU PLOMB

L'accumulateur au plomb a été mis au point par Gaston Planté en 1859.

5.11. — PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Il est formé par le couple $Pb\text{-}SO_4H_2\text{-}PbO_2$.

Durant les cycles de charge et de décharge, on constate une variation du degré de concentration de l'électrolyte, ce qui indique que l'acide sulfurique doit participer aux réactions. La théorie admise actuellement, et qui semble justifiée par des considérations de thermodynamique, fait intervenir les réactions suivantes à la décharge :

— *sur l'anode* ou *électrode négative* :

$$Pb \rightarrow Pb^{++} + 2e$$
$$Pb^{++} + SO_4H_2 \rightarrow \underbrace{SO_4Pb}_{\text{insoluble}} + 2H^+$$

— *sur la cathode* ou *électrode positive* :

$$PbO_2 + 2e + 2H^+ \rightarrow PbO + H_2O$$
$$PbO + SO_4H_2 \rightarrow \underbrace{SO_4Pb}_{\text{insoluble}} + H_2O$$

On peut écrire globalement les réactions pour chacune des électrodes, soit :

— *sur l'anode* :

$$Pb + SO_4H_2 \rightarrow SO_4\,Pb + 2\,H^+ + 2e$$

— *sur la cathode* :

$$PbO_2 + 2e + 2\,H^+ + SO_4H_2 \rightarrow SO_4Pb + 2H_2O$$

On peut additionner ces deux équations pour obtenir la réaction globale de l'accumulateur :

$$Pb + PbO_2 + 2SO_4H_2 \rightarrow 2SO_4Pb + 2H_2O$$

La charge fait intervenir les réactions inverses, soit :

— sur l'*électrode positive* :

$$SO_4Pb + 2H_2O \rightarrow SO_4H_2 + 2e + 2H^+ + PbO_2$$

— sur l'*électrode négative* :

$$SO_4Pb + 2e + 2H^+ \rightarrow SO_4H_2 + Pb$$

La réaction globale est de la forme :

$$2SO_4Pb + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 2SO_4H_2 + Pb$$

Il résulte des équations précédentes que, pendant la décharge, pour chaque ampère-heure débité :

— à la *plaque positive*, 4,46 g de PbO_2 se transforment en 5,67 g de SO_4Pb ;

— à la *plaque négative*, 3,86 g de plomb spongieux se transforment en 5,67 g de SO_4Pb ;

— dans l'*électrolyte*, 3,66 g de SO_4H_2 disparaissent et il se forme 0,67 g d'eau.

A ces variations de masse des différents constituants, correspondent des variations de volume. En admettant les valeurs suivantes pour les masses volumiques :

— SO_4Pb : 6,2 g/cm³ ;

— PbO_2 : 9 g/cm³ ;

— Pb : 11,3 g/cm³ ;

on en conclut que chaque ampère-heure débité entraîne la transformation de :

— 0,495 cm³ de PbO_2 en 0,915 cm³ de SO_4Pb ;

— 0,34 cm³ de Pb en 0,915 cm³ de SO_4Pb.

Ces variations de volume ont une très grande importance tant pour la constitution technologique des plaques que pour le fonctionnement de l'accumulateur.

Afin d'éviter la destruction des plaques au cours du fonctionnement, la matière active doit être poreuse ; les plaques négatives, accusant une variation de volume plus grande, sont plus poreuses que les positives.

Du fait de leur porosité, les électrodes retiennent une quantité importante d'électrolyte. Seul l'électrolyte imprégnant les plaques participe aux réactions chimiques, le reste constitue une réserve dont le rôle est cependant important. Pendant le fonctionnement, le liquide intérieur aux plaques subit des variations de volume et de concentration. A la décharge, par exemple, la concentration diminue en même temps que diminuent les dimensions des pores. Le liquide inactif compense cette baisse de concentration par suite de mouvements de diffusion qui s'établissent entre l'intérieur et l'extérieur des plaques. Ces mouve-

(Photo Rastelli. - ENNEP - Paris)

Fig. 12.

ments de diffusion sont très importants car, en s'opposant à une diminution trop rapide de la concentration de l'électrolyte actif, ils s'opposent à la diminution de la f.é.m. et à l'augmentation de la résistance interne.

Ils expliquent par ailleurs :

— la *remontée de la f.é.m.* et de la capacité d'une batterie qui se repose après un débit intense ;

— l'*amélioration des performances* lorsque la température s'élève (la diffusion augmente avec la température) ;

— la *baisse de f.é.m.* à circuit ouvert, après une charge.

La vitesse de ces mouvements de diffusion est liée à la vitesse de déplacement des ions ; elle est différente d'une plaque à l'autre, de sorte que la concentration de l'électrolyte varie environ deux fois plus vite dans les plaques positives que dans les plaques négatives.

5.12. — CONSTITUTION

Du point de vue technologique, un accumulateur au plomb comprend les organes suivants :

— électrodes négatives et positives appelées couramment plaques ;

— électrolyte ;

— séparateur ayant pour rôle d'empêcher les contacts entre électrodes ;

— bac chargé de contenir l'ensemble ;

— bornes de connexion, bouchons de remplissage.

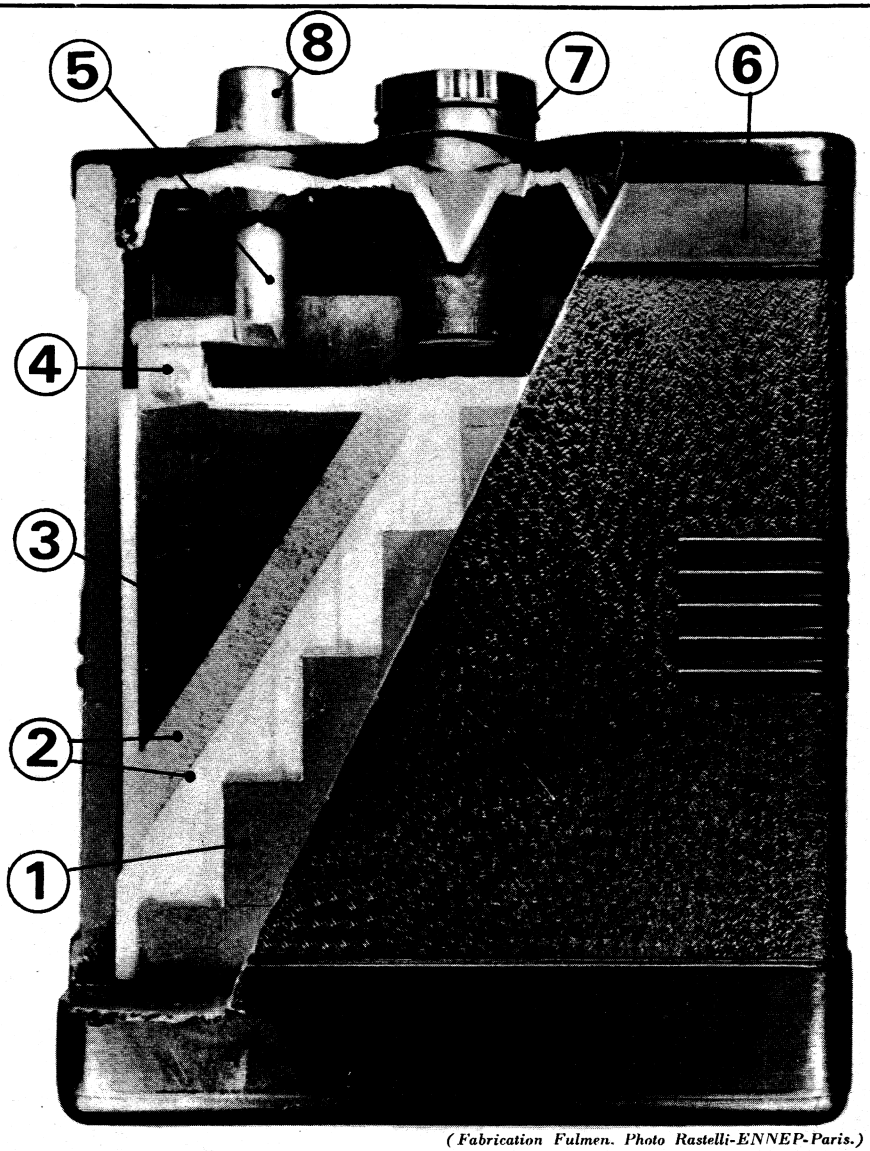
La photographie 11 illustre une batterie d'accumulateurs en coupe.

5.121. Electrodes négatives.

La matière active n'a pas de propriétés mécaniques suffisantes lui permettant de conserver une forme définie. Elle est maintenue dans une grille en alliage plomb-antimoine (Pb_{88-92}-Sn_{12-8}) (*fig.* 12). La matière active est conductrice de l'électricité et la répartition du courant sur la plaque s'effectue naturellement d'une manière convenable. En agissant sur les procédés de fabrication, on peut modifier les caractéristiques de l'accumulateur soit dans le sens d'une élévation de capacité (batteries de démarrage), soit dans le sens d'une augmentation de la durée de vie (batteries de traction ou de laboratoires).

5.122. Electrodes positives

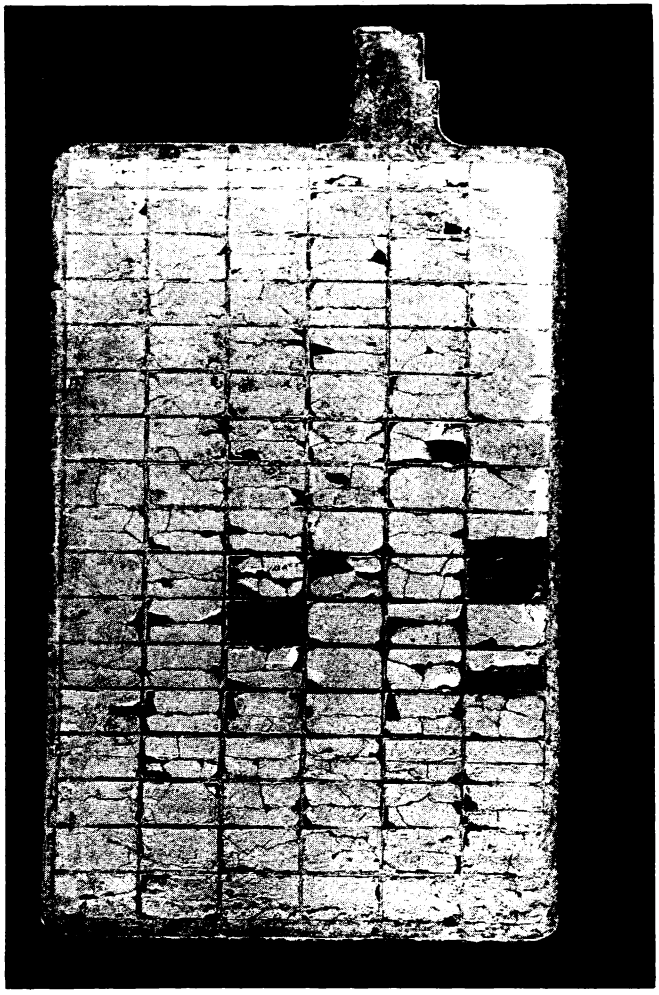
Comme pour les plaques négatives, la matière active est maintenue dans une grille en plomb-antimoine sensiblement identique à la grille négative. A



(Fabrication Fulmen. Photo Rastelli-ENNEP-Paris.)

Fig. 11. — Batterie d'accumulateurs en coupe.

1. Plaque négative.
2. Séparateurs.
3. Plaque positive.
4. Queue de plaque.
5. Tige polaire.
6. Bac.
7. Bouchon.
8. Borne extérieure.



(Photo Rastelli. - ENNEP - Paris)

Fig. 13.

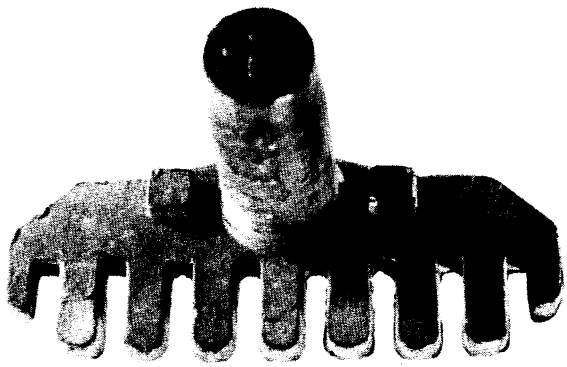
la fabrication, la grille est garnie d'oxydes partiellement sulfatés (sous-oxyde Pb_2O, minium Pb_3O_4, litharge PbO). Au cours de la charge, ces oxydes se transforment en peroxyde PbO_2 de structure poreuse dont l'enchevêtrement des cristaux détermine la solidité mécanique. La conductibilité électrique est médiocre et la répartition du courant sur toute la surface de la plaque est assurée par la grille dont le quadrillage est plus serré que sur les plaques négatives. La *figure* 13 illustre une plaque usagée.

5.123. Montage des électrodes.

Généralement un accumulateur est formé par l'association en parallèle de plusieurs plaques de chaque polarité. A cet effet, chaque plaque est munie d'une queue de connexion : les queues sont soudées sur une barre de connexion portant une borne (fût tronconique, ou plus rarement tige filetée), appelée tige polaire (*fig.* 14).

Les groupes négatifs contiennent une plaque de plus que les groupes positifs, de telle sorte que l'ensemble étant monté, une plaque positive se trouve toujours intercalée entre deux plaques négatives.

La mise en série d'éléments se fait par des barrettes en plomb soudés sur les tiges polaires (1).



(Photo Rastelli.)

Fig. 14.
Barres de connexion entre plaques

(1) Il s'agit uniquement de batteries monobloc comportant plusieurs éléments. Il est évident que la mise en série de batteries séparées est possible dans une installation, par n'importe quel moyen de connexion.

5.124. Electrolyte.

Il est constitué par une solution aqueuse d'acide sulfurique. A l'état chargé, sa densité est normalement de 30° Baumé à 15 °C, ce qui correspond à une masse volumique de 1,263 kg/dm³, soit 0,441 kg d'acide sulfurique et 0,822 kg d'eau par litre de solution, ou, encore, à un pourcentage d'acide (en masse) de 34,84 %.

Cette densité correspond au maximum de capacité compatible avec la meilleure conservation de la charge à circuit ouvert. Elle est toutefois variable suivant l'utilisation envisagée pour l'accumulateur. Dans le cas de températures ambiantes élevées, on a intérêt à diminuer la densité (jusqu'à 26° Baumé) en raison des phénomènes chimiques qui pourraient abréger la vie de la batterie avec un électrolyte trop concentré. Au contraire, pour obtenir une capacité plus élevée, au détriment de la durée de vie, la densité de l'électrolyte peut être poussée à 32° Baumé.

La présence de toute matière autre que l'acide sulfurique et l'eau est nuisible. Les éléments métalliques peuvent provoquer des sulfatations spontanées ou des courts-circuits locaux. Les éléments organiques, les sels solubles, les chlorures et les produits nitreux désagrègent les matières actives, surtout dans les plaques positives.

Pour toutes ces raisons, il est essentiel de préparer l'électrolyte :

— en *utilisant de l'acide sulfurique au soufre* ou de l'acide obtenu par procédé de contact, à l'exclusion des acides obtenus dans les chambres de plomb ;

— en *diluant l'acide avec de l'eau distillée.* Verser l'acide dans l'eau, lentement et en remuant ;

— en *faisant usage d'ustensiles en plomb*, verre, grès, porcelaine ou ébonite, à l'exclusion d'autres matières.

Des électrolytes dits « spéciaux » sont en vente dans le commerce et seraient susceptibles, aux dires de leurs fabricants, de prolonger la vie des accumulateurs, voire de régénérer des éléments détériorés. Ils contiennent généralement des suspensions de magnésie et d'alumine et quelques autres sels. Au cours de la charge, des dépôts de magnésie et d'alumine hydratées se forment sur les plaques négatives et les font gonfler, leur redonnant ainsi une certaine porosité. En général, les résultats obtenus sont nuls ou médiocres, et si, quelquefois, on assiste à une amélioration, une charge lente de désulfatation aurait été beaucoup plus efficace.

La concentration de l'électrolyte varie pendant le fonctionnement (*tableau III*). A 12 ou 15° Baumé on peut admettre qu'un accumulateur est pratiquement déchargé (1).

Le *tableau IV* groupe quelques caractéristiques de l'électrolyte en fonction de sa concentration.

TABLEAU III

A-h débités par litre d'électrolyte	Densité de l'électrolyte en degrés Baumé	Diminution de volume en pourcentage
0	30	0
20	26,5	1,9
40	22,7	3,9
60	18,5	5,7
80	13	7,1
100	7	8,5
120	0,5	9,9

TABLEAU IV

Densité en degrés Baumé à 15 °C	Masse volumique (en g/cm³)	SO_4H_2 (en g/l)	H_2O (en g/l)	Résistivité électrique (en Ω/cm²/cm)	Température de congélation (en °C)
10	1075	117	958	2,4	— 5,5
15	1116	186	930	1,8	— 9
20	1162	259	903	1,5	— 16,5
25	1210	346	864	1,36	— 29
30	1263	441	822	1,4	< — 40
35	1320	548	772	1,5	< — 40

(1) En réalité, à la fin de la décharge, la concentration en acide de l'électrolyte à l'intérieur des pores des matières actives est voisine de zéro. La densité mesurée au densimètre est celle du liquide extérieur. Les mouvements de diffusion compensent au bout d'un certain temps ce déséquilibre.

5.125. Séparateurs.

Bien que ne participant pas aux réactions chimiques, ils ont un rôle important et conditionnent les performances et la durée des accumulateurs. Ils doivent :

— *maintenir les plaques* positives et négatives à l'écartement prévu ;

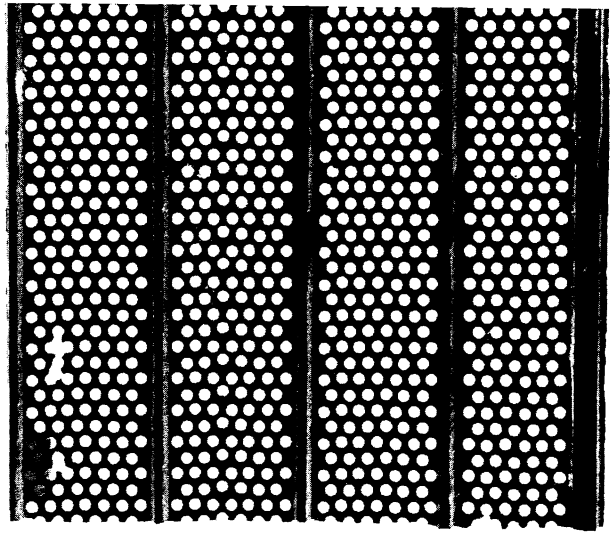
— *retenir la matière active* qui tend à s'échapper des plaques ;

— *s'opposer au cheminement* entre plaques de la matière désagrégée ;

— *permettre les mouvements* des ions, du liquide et des gaz.

Les types suivants sont employés :

◆ **Ébonite** : une plaque en ébonite est munie de nervures verticales. Des trous d'un diamètre voisin de 2 mm occupent environ le tiers de la surface sur les parties non nervurées. Les performances électriques sont assez médiocres, mais l'écartement des plaques est bien assuré (*fig.* 15).



(Photo Rastelli. - ENNEP - Paris)

Fig. 15.
Séparateur en ébonite.

◆ **Bois nervuré** : très poreux, il conduit à une résistance électrique faible, mais il résiste mal à l'action chimique de l'électrolyte. On emploie le cèdre de l'ouest américain (en voie d'épuisement), le sapin Douglas, le pin d'Orégon, le peuplier français, le pin sylvestre, l'épicéa, le pin de Corse. Un traitement chargé d'éliminer les matières organiques est nécessaire avant l'emploi.

◆ **Voile de bois** : il est, soit épais et traité comme les séparateurs en bois nervuré, soit mince (0,3 à 0,4 mm) et non traité. On utilise le peuplier, le platane, l'épicéa, le pin de Corse.

◆ **Laine de verre** : elle s'utilise sous forme de diaphragmes formés par des fibres de quelques microns de diamètre et agglomérées par de la dextrine, de l'amidon ou de la bakélite.

◆ **Caoutchouc poreux** : d'un prix très élevé, il est concurrencé par les séparateurs en matière plastique.

◆ **Chlorure de polyvinyle** : il s'emploie sous forme ondulée comme distanceur entre plaques.

◆ **Polystyrène** : il a à peu près la forme des séparateurs en ébonite avec l'avantage d'une épaisseur plus faible et d'une plus grande surface de passage.

Tous ces séparateurs s'emploient en association ; le type d'accumulateur, l'utilisation prévue, l'expérience du fabricant, le prix de revient sont des facteurs déterminants.

5.126. Bac.

Il doit assurer le maintien des plaques, être inattaquable par l'acide et isolant.

Suivant l'utilisation de la batterie, on emploie :

— le *verre* pour les batteries fixes ;

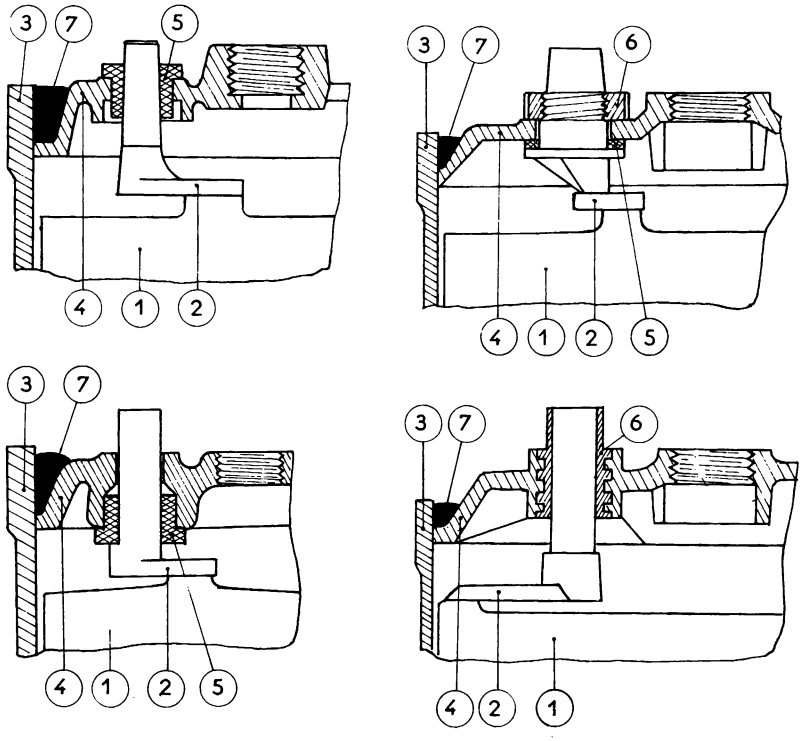
— l'*ébonite* ;

— la *matière moulée* à base d'asphaltes.

Des essais sont faits avec des matières plastiques.

Les plaques reposent par leur partie inférieure sur des tasseaux prévus dans le fond du bac. Il existe aussi un espace libre dans lequel les matières actives positives pourront se déposer sans mettre les plaques en court-circuit.

Le bac est fermé par un couvercle scellé avec un mastic à base de brai. Le couvercle est aménagé de façon à laisser le passage des tiges polaires et à permettre le remplissage et les vérifications de l'électrolyte (*fig.* 16). Les bouchons doivent permettre le passage des gaz mais non de l'électrolyte ; des chicanes assurent une solution satisfaisante.



(D'après document Fulmen.)

Fig. 16. — Passage des tiges polaires.

1. Plaque.
2. Barre de connexion.
3. Bac.
4. Couvercle.
5. Bague en caoutchouc.
6. Bague en plomb.
7. Mastic de fermeture.

5.13. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

5.131. Force électro-motrice.

Elle est égale, comme dans tout générateur électro-chimique, à la différence des potentiels de chaque électrode. Ce potentiel dépend de la concentration de l'électrolyte et il varie donc pendant la charge, la décharge et les périodes de repos à circuit ouvert ; la plaque positive variant plus vite que la plaque négative.

Entre 1 et 35° Baumé la f.é.m. a sensiblement pour valeur :

$$E = 2{,}10 - 0{,}009\ (30 - d),$$

d désignant la densité en degrés Baumé.

La notion de f.é.m. est, la plupart du temps, remplacée par celle de tension aux bornes, que ce soit en charge ou en décharge. Par la suite, sauf exception, il ne sera fait mention que de la tension aux bornes.

La tension nominale à retenir dans les calculs a été fixée conventionnellement à 2 V.

5.132. Capacité.

La capacité est proportionnelle à la masse de matière active entrant en réaction. Elle devrait, en principe, dépendre des dimensions extérieures de l'accumulateur. En réalité elle varie considérablement avec l'épaisseur et la porosité des plaques, l'épaisseur des séparateurs, le régime de décharge, la température, la tension d'arrêt tolérée.

Il est donc nécessaire de préciser les conditions dans lesquelles la capacité est déterminée. A titre d'exemple, la capacité est définie :

- — pour les *batteries de traction*, pour une décharge en 5 h ;
- — pour les *batteries de démarrage*, pour une décharge en 10 h ;
- — pour certaines *batteries à faible débit*, pour une durée très supérieure (clôtures électriques en 200 h).

En ce qui concerne les *batteries d'automobile*, les normes précisent :

- — la *capacité dimensionnelle*, liée aux dimensions extérieures, et qui doit être atteinte dès la mise en service ; elle est désignée symboliquement par P ;
- — la *capacité nominale*, désignée par le symbole C, indiquée par le fabricant qui doit être atteinte au cours de la vingt-cinquième décharges dans des conditions bien déterminées.

Pour tous les types d'accumulateurs, la capacité maximale n'est atteinte qu'au bout de plusieurs cycles de charge et décharge.

Dans tous les cas de décharge à fort régime, seule la surface extérieure des plaques entre en réaction ; la capacité dépend alors beaucoup plus de cette surface que de la quantité de matière active.

5.133. Résistance interne.

Elle varie, pour un élément donné, suivant l'état de charge. Elle est minimale lorsque l'élément est chargé. Pour un élément de démarrage de 100 Ah, elle est de l'ordre de 8 à 10/10 000 Ω.

Elle dépend, pour des éléments de construction différente, de la concentration de l'électrolyte, de la nature et de l'épaisseur des séparateurs, de la porosité des plaques et de leur épaisseur.

5.14. — CHARGE

5.141. Considérations générales.

La charge peut s'effectuer soit avec un courant continu, soit avec un courant redressé. La tension aux bornes de chaque élément varie de 2,10 V à 2,30 V très lentement puis brusquement de 2,30 à 2,45-2,70 V. A partir de 2,35 V, il y a décomposition de l'électrolyte et apparition de gaz sur les plaques négatives d'abord, puis sur les plaques positives. Ce dégagement gazeux est proportionnel à l'intensité de charge et il tend à désagréger les plaques. On a donc intérêt à le réduire au minimum. Dans la pratique on peut suivre la règle générale suivante :

— le régime de charge peut être élevé tant que la batterie ne bouillonne pas, mais il faut diminuer ce régime le plus possible dès que la tension aux bornes d'un élément dépasse 2,35 V ;

— la quantité d'électricité à fournir à la charge est supérieure de 10 à 20 % à la quantité d'électricité déchargée.

Les régimes de charge les plus fréquents sont :

— le *régime C/10 pour la charge normale* ;

— le *régime C/20* correspondant au traitement de désulfatation et utilisé également pour les *charges de mise en service* ;

— plus rarement le *régime à charge plus rapide à* 0,15 *C.*

Un accumulateur est chargé lorsqu'on peut obtenir simultanément les indices suivants :

— *bouillonnement franc* et dégagement gazeux à la surface de toutes les plaques ;

— *densité de l'électrolyte* constante depuis deux heures au moins et pendant un temps égal au dixième du temps de charge dans le cas de charges lentes ;

— *tension en charge constante* dans les mêmes conditions de temps.

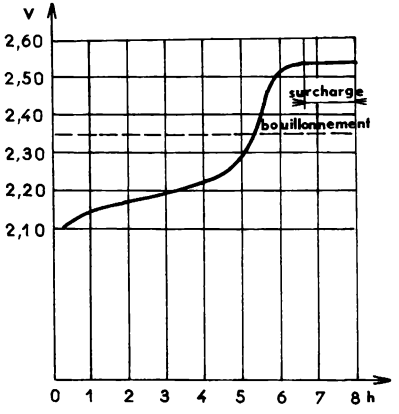
5.142. Différentes méthodes de charge.

Les seules méthodes de charge rationnelle sont celles qui évitent tout bouillonnement superflu. On peut distinguer :

— la *charge lente à intensité constante* ;

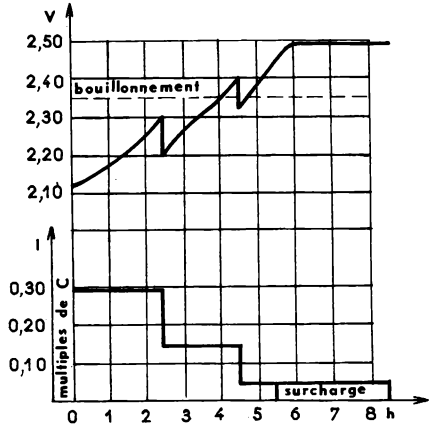
— les *charges à intensité décroissante* soit à décroissance continue (tension constante), soit à décroissance discontinue ;

— les *charges spéciales* : mise en service, désulfatation, égalisation, entretien, charge rapide, biberonnage, flottante (1).



(D'après Fulmen.)

Fig. 17. — Charge à intensité constante à 0,15 C.



(D'après Fulmen.)

Fig. 18.
Charge à régime décroissant.

◆ **Charge à intensité constante.**

Afin de retarder le bouillonnement et d'obtenir un bon rendement, on a intérêt à charger à un régime faible : 0,05 C à 0,10 C. Le diagramme de charge est représenté sur la *figure* 17.

◆ **Charge décroissante discontinue.**

Le principe consiste à charger avec l'intensité maximale compatible avec un bon rendement, et à diminuer le régime de charge dès l'apparition du bouillonnement. Le diagramme de charge, représenté sur la *figure* 18, concerne une batterie ayant reçu sa charge dans les conditions suivantes :

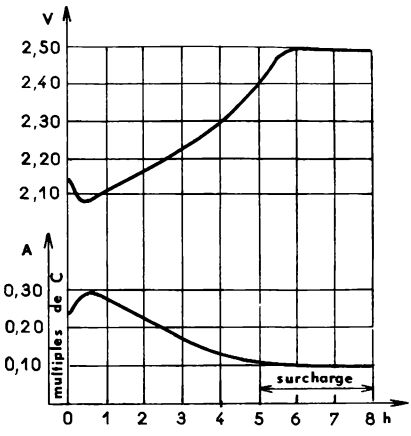
— 0,7 C Ah en 2 h 30 mn, soit au régime de 0,3 C A ;

— 0,26 C Ah en 2 h, soit au régime de 0,15 C A ;

— 0,04 C Ah en 1 h, soit au régime de 0,05 C A.

(1) Appelée communément « floating ».

On reproche à ce procédé de nécessiter la présence d'un opérateur attentif et consciencieux.



(D'après Fulmen.)

Fig. 19.
Charge à tension constante avec résistance additionnelle.

◆ Charge à décroissance continue dite à tension constante.

Le principe consiste à monter en série avec la batterie une résistance additionnelle et à alimenter le tout sous une tension constante. Il est recommandé de choisir une tension de 2,60 V par élément et de régler la résistance pour que la charge complète s'effectue en 6 à 9 heures (*fig.* 19).

◆ Charge de mise en service.

Il est très rare qu'une batterie ne soit pas stockée pendant un certain temps entre sa fabrication et sa mise en service. Il est donc généralement nécessaire de la charger avant sa mise en service. Cette charge doit être conduite en fonction de l'état de livraison.

— *Batteries livrées chargées remplies d'électrolyte* : il est recommandé de leur faire subir une charge en régime C/20 jusqu'à l'obtention des indices de fin de charge.

— *Batteries livrées chargées vidées* : les plaques peuvent être soit humides, soit séchées à l'étuve. Dans tous les cas, il est nécessaire de remplir avec de l'électrolyte et de procéder à une charge à C/20 en suivant à la lettre les prescriptions du fabricant.

— *Batteries livrées déchargées vidées* : comme dans le cas précédent, les plaques peuvent être, soit humides, soit séchées à l'étuve. Afin de réduire dans les meilleures conditions les plaques négatives, il est conseillé d'effectuer une charge à double remplissage en procédant de la façon suivante :

• *Remplir avec de l'électrolyte* à 3° Baumé et charger à C/20 ;

• *Vider la batterie* et la remplir avec un nouvel électrolyte. La densité de cet électrolyte doit être plus forte que la densité normale à obtenir, du fait de la faible quantité d'électrolyte retenu par les pores de la matière active et des séparateurs ; elle varie également suivant le degré final de l'électrolyte de première charge (pratiquement de 33 à 55° Baumé) et on a intérêt à suivre scrupuleusement les instructions du fournisseur ;

— *Charger à C/20* pendant deux heures afin d'homogénéiser l'électrolyte, puis régler sa densité à la valeur normale.

◆ **Charge rapide** (*fig.* 20).

Elle consiste en une charge à très fort régime (de l'ordre de C ou même davantage) qui est arrêtée ou réduite soit après un certain temps, soit lorsque la température de l'électrolyte atteint une valeur déterminée.

Elle nécessite des équipements spéciaux, et est très néfaste pour la durée de vie de l'accumulateur. On ne doit la considérer que comme un moyen de dépannage urgent.

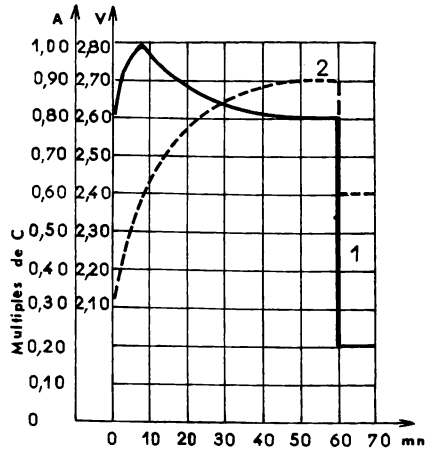


Fig. 20.
Charge rapide d'un élément déchargé
1. Variations de l'intensité.
2. Variations de la tension.

(D'après Fulmen.)

◆ **Charge d'entretien.**

Elle s'applique à des accumulateurs en stock et doit essentiellement compenser la perte de charge à circuit ouvert (environ 1 % par jour). Le régime à faible intensité ($\leqslant$ 0,05 C) est maintenu jusqu'au bouillonnement. La périodicité de charge varie de 8 jours à 2 mois.

◆ **Charge d'égalisation.**

Lorsque des batteries (de traction notamment) reçoivent des charges journalières insuffisantes, une charge à faible régime effectuée chaque huitaine ou chaque quinzaine permet d'amener tous les éléments au même état de charge complète.

◆ **Biberonnage.**

Il consiste en une charge partielle à régime élevé, dispensée aux batteries de traction ayant débité de 0,5 à 0,8 C. Il est généralement effectué au moment de la pause de midi. Le biberonnage permet d'utiliser une batterie de capacité moindre, mais réduit sa durée de vie ; de plus, le véhicule est nécessairement immobilisé pendant la charge.

◆ **Charge flottante** (marche équilibrée).

La batterie est connectée en permanence au générateur de charge et ne débite qu'en secours. On compense les pertes à circuit ouvert et les débits occasionnels par une charge continue.

La tension doit être réglée à 2,20 V par élément, ce qui entraîne un courant de charge permanent de l'ordre de C/1 000. Ce fonctionnement ne doit être utilisé qu'avec des batteries spéciales et en aucun cas sur des batteries de démarrage dont les grilles positives seraient détruites par la charge continue.

◆ **Batteries de démarrage montées sur véhicule.**

Le régime de charge est très variable. Il dépend :

— de la durée des parcours ;
— de la consommation des récepteurs ;
— des temps de repos ;
— des temps de ralenti du moteur (1) ;
— du réglage du régulateur de tension.

On comprend, alors, l'intérêt du meilleur réglage du régulateur et surtout les prescriptions impératives des constructeurs recommandant de n'effectuer aucune modification des réglages.

5.15. — DÉCHARGE

Durant la décharge, on constate les phénomènes électriques suivants :

— *baisse continue de la f.é.m.* due à la diminution de concentration de l'électrolyte (cette baisse est de l'ordre de 9/1 000 V par degré Baumé) et à la modification des degrés d'oxydation et de réduction des matières actives ;
— *augmentation* de la résistance interne due à la fois à l'obstruction progressive des pores dans les matières actives et à la diminution de concentration de l'électrolyte ;
— *diminution de la tension aux bornes* résultant des deux phénomènes précédents.

Les indices de fin de décharge sont beaucoup moins nets que les indices de fin de charge. Si un élément isolé peut être déchargé sans inconvénient majeur jusqu'à l'annulation de sa f.é.m. (à condition de le recharger immédiatement), il serait dangereux de vouloir épuiser complètement une batterie. En effet, certains éléments ayant une capacité moindre risqueraient d'être complètement déchargés avant les autres et ils s'inverseraient sous l'effet du courant fourni par les autres éléments. L'inversion d'un élément entraîne l'apparition de plomb sur les plaques positives et de peroxyde de plomb sur les plaques négatives. Il se crée des couples locaux qui se comportent comme des éléments en

(1) Certains véhicules modernes sont munis d'un alternateur qui présente, entre autres avantages, celui d'assurer une charge de la batterie pour une vitesse de rotation du moteur très faible. La batterie est donc chargée, même pendant les temps de ralenti.

court-circuit ; des sulfatations locales se produisent brutalement. L'augmentation de volume est telle que les grilles gondolent et éclatent. L'inversion signifie pour un élément la mort quasi-immédiate.

En pratique, la décharge est arrêtée à une certaine tension dont la valeur dépend du régime des récepteurs alimentés. A titre d'exemple, le *tableau V* indique les valeurs retenues par l'U.T.E. pour les batteries d'automobile.

Le *tableau VI* indique les performances obtenues par un élément de 100 Ah ayant subi des régimes de décharge différents.

On remarque l'importance des variations de capacité en fonction de l'intensité de décharge. Les variations de la tension en fonction du temps sont représentées sur la *figure* 21.

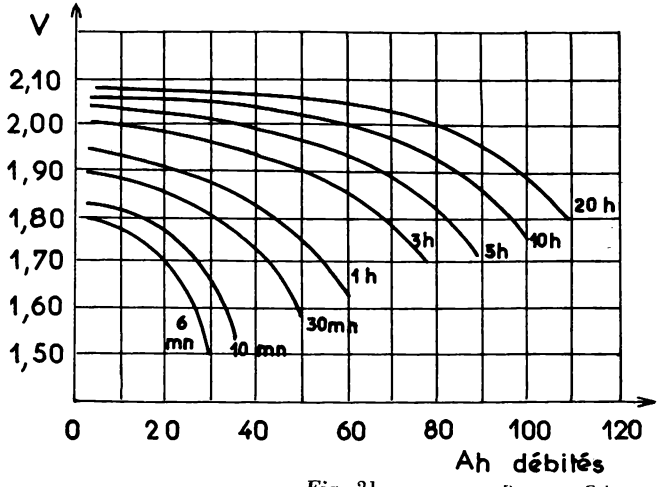


Fig. 21. *(Document Fulmen.)*

5.16. — INCIDENTS DE FONCTIONNEMENT

5.161. Influence de la température et de la concentration.

Dans les conditions normales de fonctionnement, le sulfate de plomb est pratiquement insoluble dans l'électrolyte.

Si on élève la température et la concentration, des phénomènes parasites apparaissent :

— la *solubilité du sulfate de plomb s'accroît* et les plaques se déforment ;

— le *plomb spongieux des négatives se dissout* dans l'acide avec dégagement d'hydrogène ;

— le *bioxyde de plomb* devient également soluble et il y a dégagement d'oxygène.

TABLEAU V. — *Différents types de décharges normalisées pour une batterie d'automobile* (d'après norme C 58-710).

Type de décharge	Régime de décharge en A	Température d'essai en °C	Tension d'arrêt en V	Observations.
Lente.	0,1 P	+ 25	1,75	*Charge préalable effectuée à 0,1 P.*
Rapide (Aptitude au démarrage).	3 P	+ 25	1,5	*Doit être précédée d'une décharge lente et d'une charge à 0,1 P.*
		0	1,4	
		— 15	1,33	
Endurance.	0.4 P	+ 25		*Série de décharges au cours desquelles on demande 0,4 P Ah suivis de charges à 0,5 P Ah. Charges d'égalisation tous les 25 cycles. Vérification de capacité tous les 25 cycles avec décharge à 0,1 P et tension d'arrêt à 1,75 V.*

TABLEAU VI. — *Décharge à différents régimes d'un élément de* 100 *Ah* (d'après Fulmen).

Intensité de décharge en A	Durée de décharge	Capacité à 25 °C en Ah	Tension d'arrêt en V	Tension moyenne de décharge en V
5,5	20 heures	110	1,79	2,01
10	10 heures	100	1,75	1,98
17,8	5 heures	89	1,71	1,94
26,3	3 heures	79	1,67	1,91
61	1 heure	61	1,61	1,84
100	30 minutes	50	1,57	1,80
216	10 minutes	36	1,52	1,73
300	6 minutes	30	1,50	1,70

5.162. Danger des surcharges.

En cas de surcharge à fort régime, il se forme du persulfate de plomb $Pb(SO_4)_2$ au détriment de la matière active positive : ce persulfate se dissout dans l'acide froid concentré et c'est encore une cause de destruction des plaques.

5.163. Sulfatation anormale des plaques.

Si on laisse pendant un temps assez long un accumulateur déchargé, il apparaît, sur les plaques, des tâches blanches provenant de la transformation du sulfate de plomb divisé, obtenu au cours de la décharge en sulfate de plomb cristallisé. Il s'ensuit la formation d'une couche imperméable, très difficile à réduire à la charge. La tendance à la sulfatation des plaques varie avec le degré de concentration de l'électrolyte ; elle passe par un minimum pour une concentration de 14 %. La sulfatation est responsable d'une baisse de capacité de l'accumulateur : par ailleurs la récupération d'une plaque sulfatée devenant de plus en plus difficile au fur et à mesure des progrès de la sulfatation, on a tout intérêt à maintenir constamment les accumulateurs dans un état de charge suffisant, pendant les périodes de repos.

Si on se trouve en présence d'une batterie sulfatée, il est quelquefois possible de la régénérer par un traitement dit de désulfatation. Il consiste essentiellement en une charge à faible régime. Suivant le degré de sulfatation, le traitement s'effectue soit sans remplacement de l'électrolyte, soit à l'eau.

◆ **Désulfatation sans changement d'électrolyte.**

Le courant de charge, au plus égal à C/20, est maintenu de façon à donner à la batterie une quantité d'électricité égale à deux fois sa capacité. Il est recommandé de décharger ensuite la batterie à régime lent et de recommencer la charge lente.

◆ **Désulfatation à l'eau.**

Si le traitement précédent n'a pas donné un résultat suffisant, on peut opérer de la façon suivante :

— *vider et égoutter la batterie* ;

— *remplir à l'eau distillée* :

— *charger à C/20* ;

— *arrêter la charge* au bout de 24 h au plus, ou dès que la concentration de l'électrolyte est de 15° Baumé ;

— *recommencer le cycle complet* (vidage, remplissage à l'eau, charge lente) deux ou trois fois suivant les résultats obtenus, jusqu'à constater une densité d'électrolyte et une tension constante, pendant au moins 2 heures ;

— *remplir l'électrolyte* par une solution appropriée d'acide sulfurique et remettre en charge pendant 2 heures afin d'homogénéiser l'électrolyte.

5.17. — CONSERVATION ET DURÉE DE VIE

La conservation des accumulateurs au plomb nécessite leur maintien à l'état chargé en permanence (voir charge d'entretien, p. 403).

Il est également possible, dans le cas d'un repos très long, de conserver la batterie vide d'électrolyte. On procède alors de la façon suivante :

— *s'assurer auprès du constructeur* que les séparateurs supportent la mise à sec ;
— *décharger à faible régime* ;
— *vider et égoutter la batterie* ;
— *remettre les bouchons* ;
— *conserver à l'abri du gel.*

La remise en service nécessite une charge à double remplissage (p. 402).

La durée de vie dépend pour une grande part des plaques positives. Elle varie également avec l'épaisseur des plaques, le type de séparateur, les régimes de charge et de décharge et, d'une manière générale, avec l'entretien. Pour les batteries de démarrage, la durée de vie peut varier entre deux et six ans. Les batteries fixes, à faible capacité spécifique, ont généralement une vie plus longue.

5.2. — ACCUMULATEURS ALCALINS

L'invention et la mise au point en sont dues à Georges Darrieus (1893), vice-amiral français, Jungner, ingénieur suédois (1899) et Edison, inventeur américain (1901).

5.21. — PRINCIPE

Ils utilisent le couple fer-nickel ou cadmium-nickel ; l'électrolyte est une solution de potasse additionnée ou non d'hydroxyde de lithium (lithine).

Les électrodes positives sont constituées par de l'hydroxyde de nickel et les électrodes négatives, suivant le cas, soit par de l'hydroxyde de fer soit par de l'hydroxyde de cadmium.

5.211. Réactions de décharge.

Sur l'électrode négative, le fer ou le cadmium s'oxyde tandis que deux électrons sont lancés dans le circuit :

$$Fe + 2OH^- \rightarrow 2 \text{ électrons} + Fe(OH)_2$$
$$Cd + 2OH^- \rightarrow 2 \text{ électrons} + Cd(OH)_2$$

Sur l'électrode positive, le composé de nickel trivalent $Ni{=}O(OH)$ est réduit à l'état bivalent suivant la réaction :

$$2\ Ni{=}O(OH) + 2H_2O + 2 \text{ électrons} \rightarrow 2\ Ni(OH)_2 + 2OH^-$$

5.212. Réactions de charge.

Sur l'électrode négative, l'hydrate de fer (ou de cadmium) est réduit suivant l'équation :

$$Fe(OH)_2 + 2 \text{ électrons} \rightarrow Fe + 2OH^-$$

Sur l'électrode positive, le nickel est oxydé à un degré supérieur :

$$2\ Ni(OH)_2 + 2OH^- \rightarrow 2\ Ni{=}O(OH) + 2H_2O + 2 \text{ électrons}$$

On note une dilution de l'électrolyte à la cathode pendant la charge.

En réalité, les équations sont beaucoup plus complexes, les ions K^+ et Li^- intervenant dans des réactions secondaires, mais les équations simplifiées permettent de comprendre l'essentiel des phénomènes de charge et de décharge.

5.22. — CONSTITUTION TECHNOLOGIQUE

Nous avons déjà vu que les matières actives se présentent sous forme d'hydroxydes, pendant toutes les phases de fonctionnement sur les plaques positives, et sur les électrodes négatives à l'état déchargé seulement. Ces hydroxydes sont de mauvais conducteurs électroniques et ce manque de conductibilité se fait encore sentir davantage pour la matière active positive qui évolue de l'état $Ni(OH)_2$ à l'état NiOOH. Cette mauvaise conductibilité est compensée dans certains cas en mélangeant la matière active à des flocons de nickel ou à du graphite.

Suivant les techniques mises en jeu pour la fabrication, on distingue les plaques suivantes :

5.221. Plaques à support perforé.

Les matières actives sont enfermées dans un support perforé devant assurer leur rétention. Ce support se présente sous deux formes différentes : pochettes rectangulaires et tubes.

◆ **Plaques à pochettes,** utilisées en plaques positives et en plaques négatives. Elles sont constituées par des étuis en feuillard d'acier perforé, solidaires les uns des autres et fixés sur un cadre en acier (*fig.* 22).

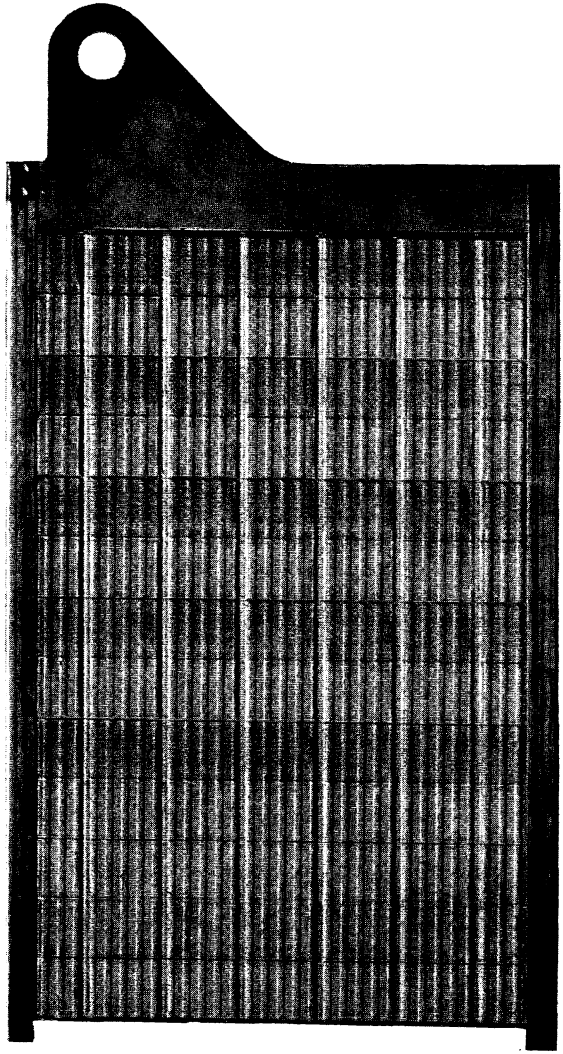


Fig. 22. (*Cliché S.A.F.T.*)

◆ **Plaques tubulaires,** utilisées exclusivement pour les plaques positives (nickel). Elles se présentent sous la forme de tubes en feuillard d'acier perforé finement et fixés sur un cadre en acier. La matière active se présente sous la forme de couches très minces tassées à l'intérieur des tubes en alternant l'hydroxyde de nickel et du nickel en flocons. Des frettes en acier assurent l'indéformabilité des tubes (*fig.* 23).

5.222. Plaques frittées.

Suivant l'épaisseur des plaques, on distingue :

— les *plaques frittées* épaisses dont l'épaisseur est de l'ordre de 2 à 3 mm et utilisées seulement comme négatives. La matière active est composée d'un mélange de poudre de cuivre et d'oxyde de fer Fe^3O_4 comprimé à froid sous très grande pression et fritté en atmosphère réductrice à 800 °C ;

— les *plaques minces* utilisées comme positives et comme négatives, d'une épaisseur de 0,4 à 0,8 mm.

Un support en nickel ou en acier nickelé reçoit une couche de poudre de nickel d'origine carbonyle, en suspension dans un gel (décomposition thermique du nickel carbonyle $Ni(CO)_2 \rightarrow Ni + 2CO$). Cette couche est tout d'abord séchée puis frittée vers 1 000 °C en atmosphère réductrice. Le nickel, après frittage, se comporte comme une éponge (80 % de porosité) à l'intérieur de laquelle on dépose les matières actives sous forme d'hydroxydes. Les plaques, après imprégnation, dans des solutions concentrées de nitrate approprié, sont traitées par une solution alcaline chaude de façon à précipiter l'hydroxyde correspondant, selon les réactions suivantes :

$$Ni(NO_3)_2 + 2\ NaOH \rightarrow Ni(OH)_2 + 2\ NO_3Na$$

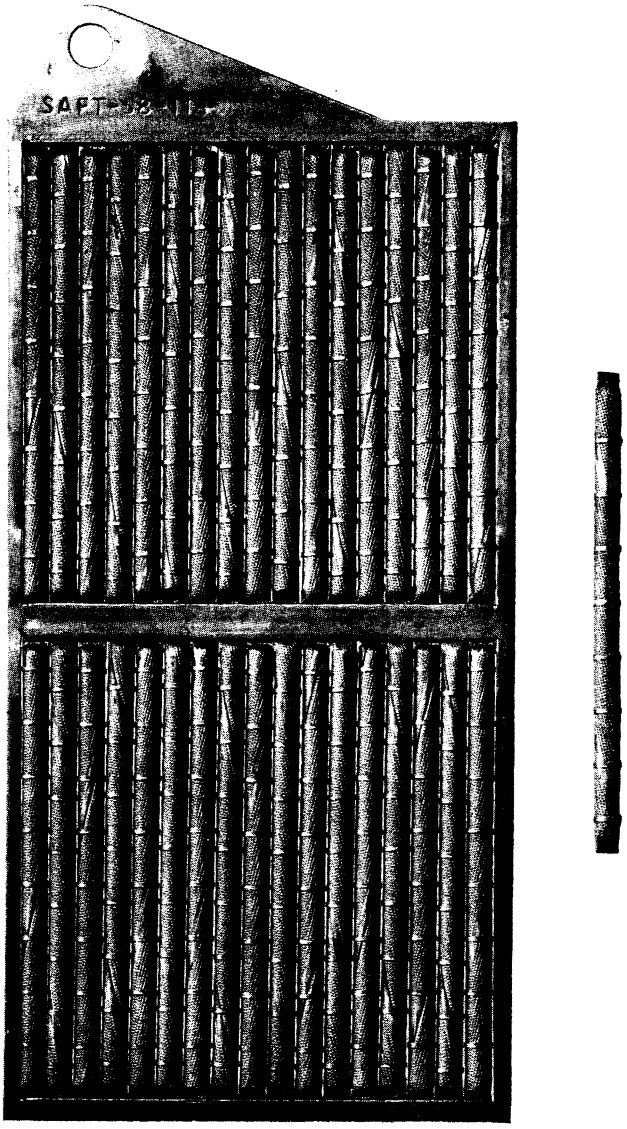
$$(NO_3)Cd_2 + 2\ NaOH \rightarrow Cd(OH)_2 + 2\ NO_3Na$$

L'hydroxyde précipité se répartit sur les parois des pores métalliques en couches extrêmement minces. Après lavage (pour éliminer les anions) et séchage, les opérations d'imprégnation et de traitement sont reprises jusqu'à ce que la quantité désirée de matière active soit déposée.

On remarquera que les plaques sont à l'état déchargé à la fin de leur fabrication.

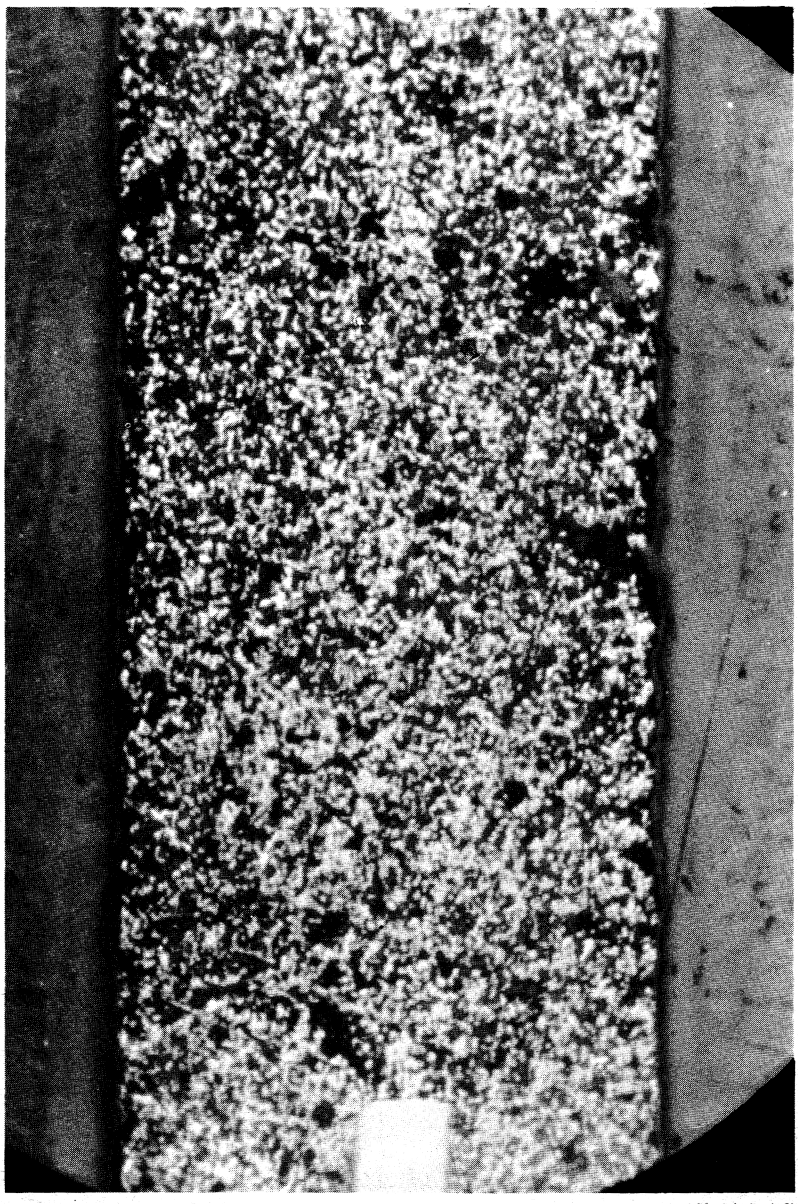
Les techniques de fabrication permettent d'obtenir les plaques en fabrication continue à partir d'un feuillard.

Il est important de noter que dans les plaques frittées la grande porosité du support conduit à une augmentation très importante de la surface des matières actives en contact avec l'électrolyte (*fig.* 24). Il en résulte un abaissement considérable de la résistance interne, ce qui a permis de déposer uniquement des hydroxydes, sans adjonction de graphite ou de flocons métalliques comme dans le cas des plaques tubulaires ou à pochettes.



(Cliché S.A.F.T.)

Fig. 23.



(Cliché S.A.F.T.)

Fig. 24. — Micrographie d'une plaque frittée.

Les plaques négatives au cadmium reçoivent uniquement de l'hydroxyde de cadmium.

Dans les fabrications actuelles les différentes combinaisons de plaques pouvant entrer dans la constitution des accumulateurs sont indiquées sur le *tableau VII.*

TABLEAU VII. — *Plaques entrant dans la constitution des accumulateurs.*

Electrode positive	Electrode négative	Courant de décharge	Capacité en Ah	Principales utilisations
Tubulaire.	**Frittée épaisse (fer).**	C/5 en régime permanent. C/2 en pointe.	100 à 1 100	*Traction.*
Tubulaire.	**Pochettes (Cd) (1).**	C/5 C/2 en pointe.	30 à 1 000	*Installations fixes (floating ou tampon). Eclairage de secours. Eclairage de bateaux, trains. Alimentation radio.*
Pochettes.	**Frittée épaisse.**	C/5. C/2 en pointe.	4 à 500	*Installations fixes. Téléphonie. Eclairage de secours. Signalisation. Centraux téléphoniques. Eclairage de secours de phares et balises.*
Pochettes.	**Pochettes.**	C/5. 3 C en pointe.	12 à 500	*Tous usages courants y compris le démarrage des moteurs thermiques.*
Frittée mince.	**Frittée mince.**	5 C en 9 minutes. 30 C en pointe.	7 à 160	*Télécommande, signalisation, secours (associés à des chargeurs à tension régulée).* *Démarrage des moteurs thermiques, auxiliaires des avions (isolées).*
Frittée mince.	**Frittée mince.**	C/5.	0,08 à 9	*Faibles débits : relais, jouets, appareils de laboratoire, surdité, signalisation lumineuse, flash, caméra, équipements à transistors.*

(1) En réalité la matière active comprend 80 % de cadmium et 20 % de fer.

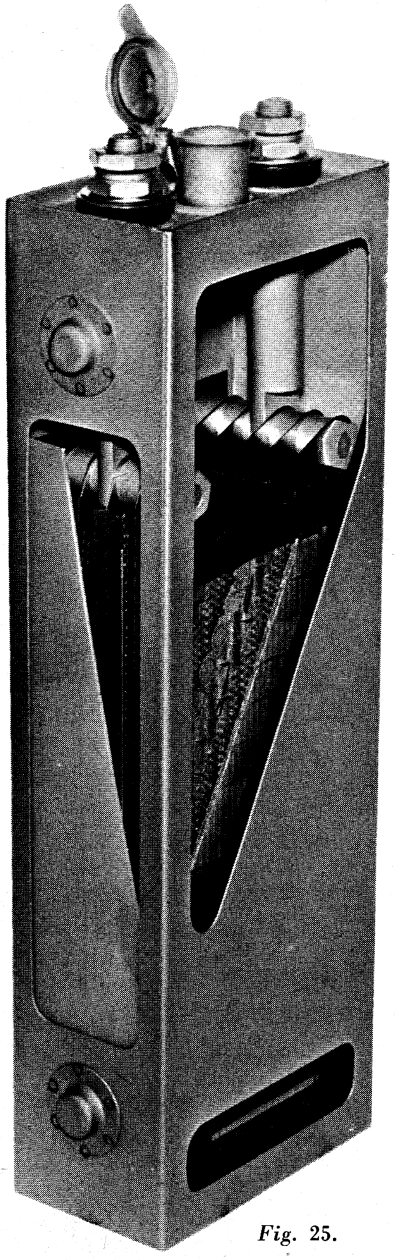


Fig. 25.

(Clichés S.A.F.T.)

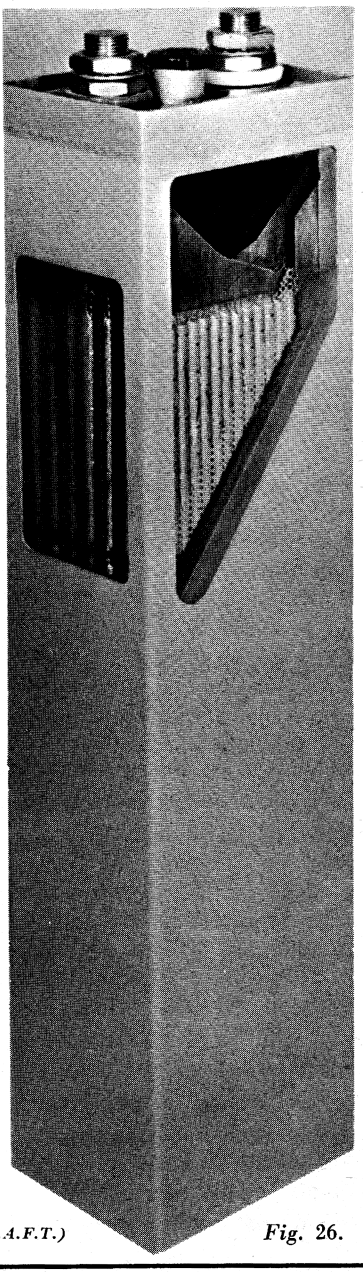


Fig. 26.

Élément ZT 6 C^{en}

Coupe

Élément fer-nickel, type MU 7, capacité 560 AR, à plaques positives tubulaires et à plaques négatives frittées, pour constitution de batteries de traction pour chariots de manutention.

5.223. Montage des plaques.

Il est nécessaire, pour obtenir la capacité désirée, de disposer plusieurs plaques en parallèle. Le montage doit assurer :

— le *maintien mécanique* des plaques à l'intérieur du bac ;

— l'*isolation électrique* des plaques de polarités différentes ;

— la *mise en parallèle* des plaques de même polarité.

Les plaques positives et négatives ont leurs têtes assemblées sur des axes portant les bornes et les entretoises de séparation. Les faces des plaques sont isolées les unes des autres par des séparateurs se présentant sous la forme de feuilles de chlorure de polyvinyle perforé dans les accumulateurs à plaques tubulaires ou à pochettes et de tissu mince, de 2 à 5/10 de millimètres d'épaisseur (polyamide), dans les accumulateurs à plaques frittées minces.

La protection électrique par rapport au bac est assurée par un feuillard isolant.

L'ensemble est installé dans un bac (en acier nickelé) muni d'un couvercle soudé au bac. Les connexions entre les têtes de plaques et les bornes extérieures traversent ce bac. Les *figures* 25 et 26 indiquent l'organisation intérieure de ces accumulateurs.

5.224. Electrolyte.

Il est constitué par une solution aqueuse de potasse à laquelle on incorpore, dans certains cas, une petite quantité de lithine.

La constitution exacte et la concentration varient avec le type d'accumulateur.

On peut constater, au cours de l'utilisation des batteries, une légère diminution de la concentration, due au fait qu'en fin de charge les gaz entraînent une petite quantité d'électrolyte ; la production de ces gaz par électrolyse entraîne nécessairement une consommation d'eau.

La densité de l'électrolyte est comprise entre 17 et 29° Baumé.

Il est absolument impératif de suivre à la lettre les instructions du constructeur en ce qui concerne les précautions à prendre et les qualités d'électrolyte à utiliser. (Surtout, ne pas utiliser d'acide.)

En utilisation, il importe de maintenir le niveau d'électrolyte au-dessus des plaques en effectuant un apport périodique d'eau distillée, correspondant à la consommation due à l'électrolyse.

Il est bon de savoir qu'une consommation excessive d'eau peut être le signe d'une fuite, alors qu'une consommation nulle indique un élément en court-circuit.

5.23. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

5.231. F.é.m. et tension aux bornes.

Du point de vue thermodynamique, la f.é.m. d'un accumulateur dépend des facteurs : température, degré d'oxydation des plaques négatives, degré de réduction des plaques positives (phase de décharge).

En pratique, la f.é.m., à l'état chargé, diffère légèrement suivant le type de plaques. Elle est de 1,36 V pour les plaques frittées et de 1,40 V pour les plaques perforées.

La tension nominale en décharge est prise égale à 1,2 V, mais pour certaines applications, on a intérêt à déterminer le nombre d'éléments nécessaires d'après la tension réelle aux bornes qui est évidemment variable avec le régime de décharge.

5.232. Capacité.

Elle varie, pour un élément donné, avec le courant de décharge et la tension tolérée en fin de décharge. On a tout intérêt, en exploitation, à s'en tenir aux prescriptions du constructeur. La capacité varie également, à volume égal, en fonction du type de plaque.

5.233. Résistance interne.

Encore bien plus que la capacité, elle dépend du type de plaque. A titre d'exemple, pour un élément de 100 Ah, les résistances internes sont les suivantes :

- — *plaques tubulaires* : 34/10 000 d'ohm ;
- — *plaques à pochettes* : 30/10 000 ;
- — *plaques à pochettes* associées à des plaques négatives frittées : 14/10 000 ;
- — *plaques épaisses frittées* : 7/10 000 ;
- — *plaques frittées minces* : 3/10 000.

La résistance interne d'un élément au plomb de même capacité est de l'ordre de 8 à 10/10 000 d'ohm.

5.234. Régime de décharge.

Les graphiques des *figures* 27 représentent les variations de tension d'éléments de constitution différente en fonction du courant de décharge.

Afin de disposer d'une base de calcul dans la détermination des batteries, le constructeur définit la capacité nominale pour des courants de décharge égaux à C/5, correspondant à une décharge en 5 heures.

Les courants de décharge admissibles varient dans des limites considérables suivant les types d'éléments adoptés. Dans une batterie de construction traditionnelle à plaques, à pochettes ou tubulaires, il n'est guère recommandé de dépasser les courants suivants :

— 0,1 à 0,3 C, avec pointes égales à C pour les éléments fer-nickel à positives tubulaires ;

— C pour les éléments cadmium-nickel à pochettes, avec pointes à 4 C.

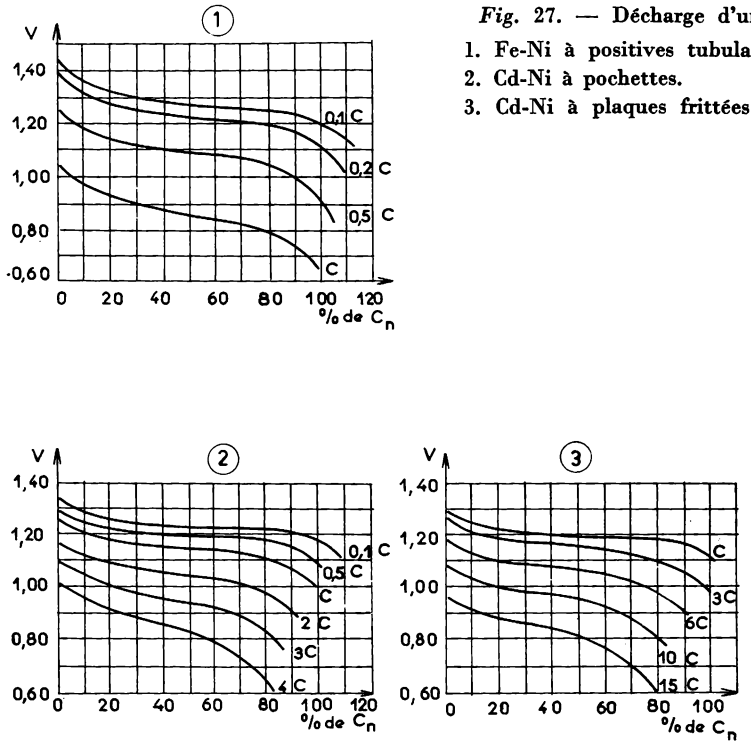


Fig. 27. — Décharge d'un élément.
1. Fe-Ni à positives tubulaires.
2. Cd-Ni à pochettes.
3. Cd-Ni à plaques frittées minces.

(Documents SAFT.)

Pour une batterie à plaques frittées minces, le courant de décharge est limité, en pratique, à 10 ou 15 C, mais, dans le démarrage des moteurs thermiques, la batterie peut sans inconvénient fournir une pointe supérieure pour le démarrage du moteur.

On remarquera que pour les batteries à pochettes, la capacité varie peu en fonction du courant de décharge, alors que la tension aux bornes varie d'une façon considérable ; au contraire, pour les plaques frittées minces, ni la capacité, ni la tension aux bornes ne sont très affectées par des courants de décharge élevés.

Il en résulte que lorsqu'on remplace une batterie de démarrage au plomb par une batterie alcaline, on choisit pour cette dernière une capacité égale au tiers de celle de la batterie au plomb.

5.24. — ENTRETIEN

5.241. Charge.

Les caractéristiques de charge varient suivant le type d'élément et suivant la nature des cycles de fonctionnement, en fonction du temps.

Dans tous les cas, la quantité d'électricité à fournir à un élément complètement déchargé est égale à 1,4 C, le courant normal de charge étant de 0,2 C ; ce qui entraîne une charge complète en 7 heures. Nous examinerons successivement les principaux cas rencontrés couramment.

◆ **Accumulateurs fonctionnant à charges et décharges successives.**

Les batteries de traction et de laboratoire fonctionnent suivant ce principe, ainsi que les batteries utilisées pour certains équipements portatifs : lampes de mineurs, émetteurs radioélectriques.

Le choix du courant et du mode de charge est déterminé, soit par la puissance dont on dispose, soit par le temps fixé pour l'opération.

— *Charge à courant constant* (*fig.* 28) : ce mode de charge oblige à prévoir un système de réglage du courant (1).

— *Charge à courant décroissant.*

On utilise ce moyen lorsqu'on ne dispose pas d'installation de charge à courant constant à réglage automatique et que l'on ne désire pas surveiller l'opération de charge. L'intensité doit cependant être maintenue entre 1,2 et 0,6 fois

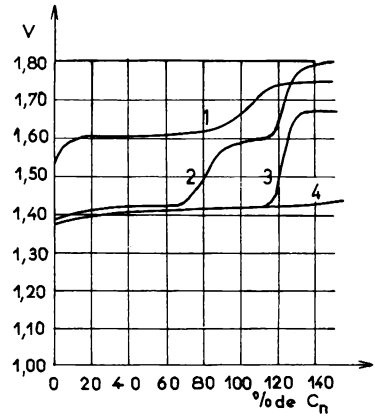


Fig. 28.

Caractéristiques de charge à courant constant.
1. Fe-Ni.
2. Cd-Ni à support perforé.
3. Cd-Ni à support fritté avec dégagement gazeux.
4. Cd-Ni à support fritté sans dégagement gazeux.

(1) Le courant est maintenu constant par réglage à des intervalles assez rapprochés, toutes les demi-heures par exemple.

l'intensité normale correspondant au temps de charge en 7 heures. La tension de la source doit être plus élevée que la tension de fin de charge de la batterie (*fig.* 29).

◆ **Accumulateurs connectés en permanence à la source de charge.**

Dans les installations fixes, il arrive fréquemment que la batterie soit branchée en permanence sur la source de charge, le circuit d'utilisation étant connecté lui-même en parallèle sur la batterie. Suivant les conditions de fonctionnement, on distingue :

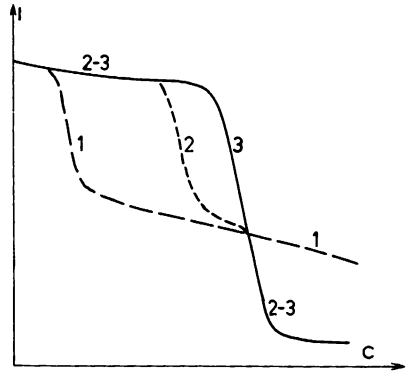


Fig. 29. — Diagramme de charge d'un élément à tension constante :
1. Fe-Ni.
2. Cd-Ni traditionnel.
3. Cd-Ni fritté.

— la *marche en tampon*, lorsque la source de charge assure un débit suffisant pour compenser la consommation moyenne du circuit d'utilisation ;

— la *marche équilibrée* (*floating*) dans laquelle la source de charge peut fournir elle-même le courant exigé à chaque instant par le circuit d'utilisation, la batterie n'entrant en action qu'au moment des coupures accidentelles de courant sur le secteur ou pour des pointes de courant à très forte intensité.

Dans tous les cas, qu'il s'agisse de marche en tampon ou en floating, la source de charge doit être prévue pour assurer la charge rapide en cas de débit accidentel important.

Le courant de charge doit être réglé à une valeur supérieure à la valeur moyenne du courant débité, afin de compenser la décharge lente qui se produit toujours à circuit ouvert. Dans la marche en tampon, ce courant est compris entre 2 C/100 et 5 C/100. Dans ces conditions, la tension aux bornes d'un élément doit rester comprise entre 1,60 et 1,65 V en période de charge, lorsque le courant débité sur le circuit est inférieur au courant absorbé par les accumulateurs, et elle doit rester supérieure à 1,30 V pendant les périodes où le courant débité par les accumulateurs est supérieur à celui fourni par la source de charge. Si ces valeurs ne sont pas respectées, il importe de régler la source en conséquence. Si les réglages sont corrects, la réserve d'électrolyte au-dessus des plaques doit s'épuiser dans un temps compris entre un et trois mois.

Dans le fonctionnement en marche équilibrée la tension aux bornes d'un élément peut varier entre 1,40 et 1,55 V mais il est indispensable de soumettre les éléments à des surcharges périodiques.

◆ **Batteries associées à des véhicules.**

Le régime de fonctionnement de ces batteries est assez particulier, en raison, d'une part, des circuits sur lesquels elles peuvent être amenées à débiter et, d'autre part, du fait qu'elles sont reliées à une source de charge dont la tension n'est pas constante dans le temps, mais variable entre deux limites déterminées par l'action du régulateur. Elles sont utilisées à la fois en régime de charges et décharges successives et en régime de marche équilibrée. En agissant sur la nature des séparateurs, on est arrivé à obtenir des éléments dont la tension remonte très rapidement en fin de charge de telle sorte qu'à partir de ce moment-là, l'intensité de charge devient très faible.

5.242. Surcharges périodiques et traitements de régénération.

Afin d'atteindre leur état de charge complet, les batteries doivent être soumises périodiquement à une charge complémentaire faisant suite à une charge normale et de préférence au régime normal de charge. La périodicité des surcharges dépend du mode d'utilisation du courant.

◆ **Batteries de traction.**

Toutes les deux semaines, surcharger d'une quantité égale à la capacité nominale, pendant 5 heures au régime normal de 0,2 C. Tous les six mois, on applique le traitement de régénération qui consiste à faire subir à la batterie :

— une *charge double*, soit 12 heures à 0,2 C ;

— une *décharge* jusqu'à épuisement à une intensité au moins égale à C/5 et de préférence aussi voisine que possible de C/2 ;

— une charge double.

◆ **Batteries fonctionnant en marche équilibrée.**

La surcharge en 5 heures au régime normal à 0,2 C est appliquée :

— tous les mois, si la tension de marche est comprise entre 1,40 et 1,45 V par élément ;

— *tous les trois mois*, si la tension est comprise entre 1,45 et 1,50 V par élément ;

— *tous les six mois*, si la tension est comprise entre 1,50 et 1,55 V par élément.

Le traitement de régénération consistant en une décharge jusqu'à épuisement, suivie d'une charge double, est appliqué une fois par an.

◆ **Autres types de batteries.**

Le traitement de régénération est à appliquer tous les ans. On peut même l'appliquer chaque fois qu'une batterie présente une tension un peu faible, qu'elle n'a subi que des charges incomplètes ou à faible intensité ou que les surcharges périodiques ont été négligées.

Dans le cas particulier des accumulateurs avec électrodes négatives en fer, il est bon de savoir que la charge à très forte intensité en fin de charge ne peut qu'être bénéfique à la batterie. En effet, cette intensité élevée a pour effet de provoquer un dégagement important d'hydrogène sur les plaques. Cet hydrogène permet la réduction des différents oxydes de fer qui auraient pu se former sur les plaques.

La mise en service de tous les accumulateurs doit être précédée d'un traitement identique au traitement de régénération.

5.243. Renouvellement de l'électrolyte.

Dans les éléments non étanches, la surface libre de l'électrolyte se trouve nécessairement en contact avec l'air. Il en résulte, sous l'effet du gaz carbonique contenu dans l'air, une transformation lente de la potasse en carbonate de potassium dont la résistance électrique est élevée. On constate alors une diminution de la capacité et de la tension de décharge, une augmentation de la tension de charge ainsi que de la température à la charge et à la décharge. Il est alors indispensable de renouveler l'électrolyte. La périodicité de renouvellement dépend des conditions d'utilisation des batteries. Le renouvellement doit être effectué :

— *lorsque la densité de l'électrolyte est inférieure à* 18° *Baumé* ;

— *tous les deux ans au minimum* pour les batteries de traction ainsi que pour celles effectuant un service intensif quotidien ;

— *tous les trois à quatre ans* pour les autres batteries travaillant rarement ou débitant des intensités faibles.

5.25. — ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION SPÉCIALE

La construction des accumulateurs à plaques frittées minces munis de séparateurs également très minces (de 0,2 à 0,5 mm) a pour effet de diminuer fortement la résistance interne, mais aussi de supprimer la polarisation des électrodes en fin de charge. La tension de charge est comprise entre 1,40 et 1,45 V par élément et ne dépasse jamais la tension de 1,48 V correspondant à la décomposition de l'eau. Il en résulte que le dégagement gazeux en fin de charge est pratiquement nul ; on a pu, en partant de cette caractéristique, construire deux types d'accumulateurs assez particuliers :

— les *éléments semi-étanches* ;

— les *éléments étanches.*

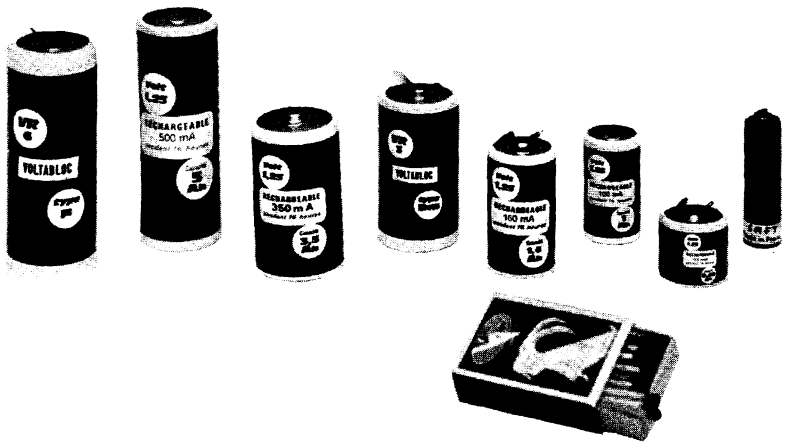
5.251. Eléments semi-étanches.

Le bac renfermant l'électrolyte et les matières actives est fermé mais, par mesure de sécurité, une soupape peut s'ouvrir sous l'effet d'une pression anormale en cas de dégagement gazeux.

Ils se fabriquent en toutes capacités, de 7 à 160 Ah, et peuvent fournir des intensités importantes. Ils sont généralement associés à des dispositifs de charge à tension constante et stabilisée à $\pm$ 1 %. Ces dispositifs sont conçus, en outre, pour maintenir les éléments à l'état de charge maximale, quel que soit le débit demandé à la batterie d'accumulateurs (1).

L'entretien de telles batteries se limite à un renouvellement de l'eau au-dessus des plaques.

5.252. Eléments étanches de faible capacité (fig. 30).



(Cliché S.A.F.T.)

Fig. 30.

Ces éléments, à plaques minces très rapprochées, peuvent être fermés d'une manière absolument étanche ; ils peuvent se substituer aux piles dans toutes leurs applications.

Ils utilisent le couple cadmium-nickel et sont constitués de plaques frittées minces. Les types fabriqués actuellement se présentent sous des formes différentes.

---

(1) Les caractéristiques indiquées correspondent aux fabrications actuelles (1966). Elles peuvent évidemment varier dans le temps, suivant les demandes des utilisateurs et les progrès techniques.

◆ **Forme bouton.**

La partie active, formée par des plaques de forme circulaire, est enfermée sans jeu dans une enveloppe constituée par deux coupelles en acier nickelé emboîtées l'une sur l'autre et serties sur un joint isolant. Les électrodes de sortie sont constituées par les coupelles. Les capacitées varient, suivant les types, de 90 à 1 750 mAh pour des masses de 6,5 g à 100 g. La mise en série s'effectue par empilage.

La charge s'effectue obligatoirement à courant constant en 15 à 18 heures au régime de C/10, ou en charge lente au régime de C/50. Il est possible de conserver ces éléments à l'état chargé en leur fournissant un courant permanent d'entretien compris entre C/100 et C/200.

◆ **Forme cylindrique.**

La partie active est formée par l'association de deux bandes frittées minces isolées l'une de l'autre et enroulées de façon à former une spirale. L'ensemble est logé, sans jeu, dans un bac cylindrique. Les électrodes de sortie sont constituées par le bac et le couvercle. Ces éléments remplacent les piles dont ils ont les dimensions extérieures. Les capacités s'échelonnent de 0,5 Ah à 6 Ah avec des masses variant de 23 à 229 g.

La charge s'effectue obligatoirement à courant constant au régime de C/10 ou, si l'élément est déchargé, au régime de C/5. La charge rapide peut s'effectuer, sur éléments complètement déchargés, au régime de C/2. Le courant d'entretien permettant de conserver, à l'état chargé, un élément au repos, se situe entre C/200 et C/50.

◆ **Forme parallélépipédique.**

Ces éléments ont la même forme extérieure que les éléments traditionnels non étanches. Les capacités varient de 0,8 à 13,2 Ah pour des masses de 50 à 560 g.

Les caractéristiques de charge sont identiques à celles des éléments boutons. Ils sont utilisés en électronique et télécommande, pour les engins spatiaux, les appareils de laboratoire et tous les équipements portatifs.

5.26. — CONSERVATION ET DURÉE DE VIE

La conservation d'accumulateurs alcalins à l'état de repos ne demande que peu de précautions. Il est possible de les stocker :

— soit à *l'état déchargé, remplis d'électrolyte*, et d'effectuer, une fois par an, une charge suivie de décharge ;

— soit à *l'état déchargé, vidés d'électrolyte.* Dans ce cas, l'obturation des orifices de remplissage doit être assurée par des bouchons en caoutchouc et une couche de paraffine. (Ce mode de stockage est déconseillé pour les éléments à négatives fer.)

La conservation des éléments à plaques frittées nécessite le maintien dans l'électrolyte ; il n'est donc pas possible de les stocker à l'état vide.

La durée de vie est généralement supérieure à dix ans ; certaines batteries fonctionnent sans défaillance pendant plus de vingt ans.

5.3. — ACCUMULATEURS ARGENT-ZINC

Le couple utilisé est constitué à l'état chargé par :

— de l'oxyde d'argent AgO pour l'électrode positive ;

— du zinc pour l'électrode négative ;

— une solution de potasse saturée de zincate de potassium pour l'électrolyte.

5.31. — FONCTIONNEMENT

Les réactions de décharge ont pour effet de réduire l'oxyde d'argent à l'état d'argent métallique, tandis que le zinc s'hydrate. Les réactions à la décharge sont les suivantes :

$$AgO + H_2O + 2e \rightarrow Ag + 2OH^-$$
$$Zn + 2OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 + 2e$$
$$\rightarrow ZnO + H_2O + 2e$$

soit globalement :

$$AgO + Zn + H_2O \rightarrow Ag + Zn(OH)_2$$

Si la décharge se fait à très faible régime, l'oxyde d'argent est réduit successivement à l'état d'Ag_2O puis à l'état d'argent métallique.

Les réactions de charge provoquent des effets inverses, soit une réduction de l'hydrate de zinc sur l'électrode négative et une oxydation de l'argent sur l'électrode positive.

5.32. — CONSTRUCTION

Les électrodes positives sont souvent constituées par une grille d'argent sur laquelle on comprime de la poudre d'argent. L'ensemble est ensuite fritté. L'oxydation obtenue par traitement électrolytique est suivie de lavage.

Les électrodes négatives sont constituées par plusieurs couches d'une grille de zinc, par dépôt électrolytique poreux de zinc sur un support approprié, ou par réduction d'électrodes en oxyde de zinc comprimé.

Les séparateurs sont à base de cellophane associée à des inter-séparateurs divers : tissus de nylon, papiers divers, etc.

L'électrolyte est pratiquement absorbé tout entier par les plaques et les séparateurs.

Les bacs sont en plastique : polystyrène ou polyméthacrylate de méthyle.

5.33. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

5.331. Force électromotrice.

Elle varie suivant l'état de charge de l'accumulateur ; à pleine charge, elle varie entre 1,84 et 1,89 V, alors qu'elle est de 1,58 V pour un élément déchargé à plus de 30 %.

5.332. Résistance interne apparente.

Elle varie, pour une même capacité, suivant le type d'accumulateur ; elle est d'autant plus faible que l'élément a été prévu pour un débit plus intense. Par exemple, un élément de 10 Ah présente une résistance interne apparente de 0,003 Ω pour le modèle prévu pour des décharges à régime élevé et 0,015 Ω pour le modèle prévu pour des décharges lentes. A titre indicatif, un élément de 85 Ah prévu pour des décharges à régime élevé présente une résistance interne de 0,0003 Ω.

5.333. Capacité.

Une des grandes qualités des accumulateurs à l'argent réside dans leurs capacités massique et volumique très élevées. L'énergie volumique à C/10 atteint 250 Wh/dm^3 dans le cas le plus favorable et l'énergie massique, dans les mêmes conditions, est de 120 Wh/kg.

5.34. — CARACTÉRISTIQUES DE DÉCHARGE

La tension nominale est de 1,5 V pour une décharge en 10 heures.

Trois types d'éléments, différant par leurs possibilités de débit, sont catalogués par les fabricants :

— *éléments à décharge ultra-rapide* prévus pour être déchargés normalement à 5 C, mais pouvant débiter sans inconvénient des pointes à 10 C pendant quelques secondes. Le facteur limitant l'intensité est l'échauffement qui ne doit pas dépasser 70 °C (*fig.* 31) ;

— *éléments à décharge rapide* dont la décharge s'effectue à une intensité de C/2, c'est-à-dire en deux heures, avec possibilité de pointes jusqu'à C (*fig.* 32) ;

— *éléments à décharge lente* ne devant pas débiter une intensité supérieure à 0,1 C (*fig.* 33).

Les séparateurs étant d'autant plus minces que les débits normaux sont plus élevés, il en résulte que les éléments à décharge rapide présentent à leurs bornes une tension en décharge supérieure à celle des éléments à décharge lente, pour une même intensité.

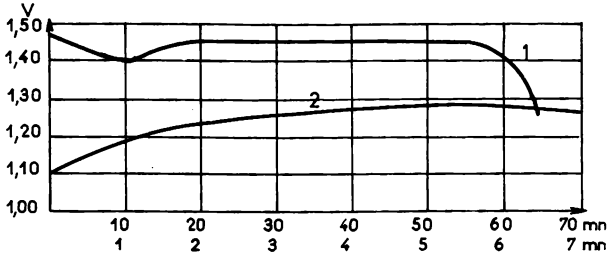


Fig. 31.

Décharge d'un élément argent-zinc ultra-rapide :
1. Au régime C.
2. Au régime 5 C.

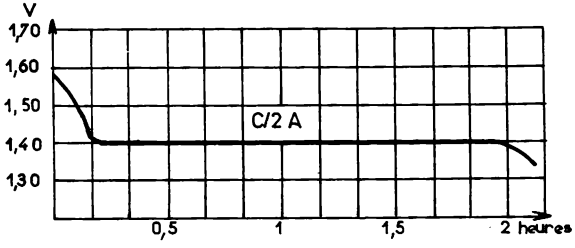


Fig. 32.

Décharge d'un élément rapide.

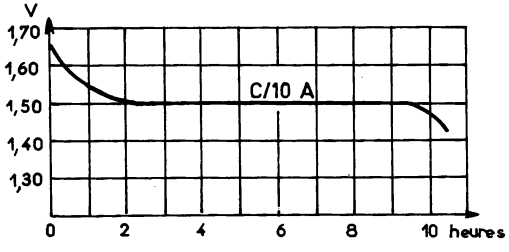


Fig. 33.

Caractéristique U (+) d'un élément argent-zinc à décharge lente.

5.35. — RÉGIMES EN DÉCHARGE

La tension aux bornes varie avec l'intensité. Au régime de C/10, la tension a une valeur de 1,5 V et, en dehors d'une surtension pendant le tout début de la décharge, elle se maintient constante jusqu'à la fin de la décharge. Cette constance de la tension durant la décharge est une des caractéristiques essentielles des accumulateurs à l'argent.

Il convient d'arrêter la décharge lorsque la tension commence à baisser en dessous de 1,25 V pour les éléments à décharge lente et environ 1 V pour les éléments à décharge ultra-rapide.

Si on descend en dessous des valeurs minimales des tensions d'arrêt, on risque l'inversion d'un ou plusieurs éléments de la batterie. En effet, les éléments de la batterie qui se sont totalement déchargés les premiers sont chargés à l'envers par le débit des éléments qui ne sont pas encore complètement déchargés. Les éléments inversés, sans être systématiquement détruits, ont leur durée de vie d'autant plus abrégée que l'inversion se produit à un régime plus fort.

5.36. — CARACTÉRISTIQUES DE CHARGE

La charge est caractérisée par trois points essentiels :

◆ **Toute surcharge est nuisible.**

Elle se traduit par l'apparition d'arborescences de zinc qui peuvent perforer le séparateur, ou passer par-dessus celui-ci jusqu'à atteindre les électrodes positives. Il en résulte alors des courants de fuite dont l'importance peut aller jusqu'au court-circuit franc.

La surcharge donne lieu également à un dégagement d'oxygène sur les électrodes positives ; cet oxygène attaque le séparateur et abrège sa vie.

La fin de charge est notamment caractérisée par la tension apparaissant aux bornes des éléments. Pour ne pas surcharger les éléments, il convient donc de ne pas dépasser les tensions suivantes, mesurées pour un courant de l'ordre de C/20 à C/25 A :

2,05 V par élément ultra-rapide,

2,05 à 2,10 V par élément rapide,

2,10 à 2,15 V par élément lent.

◆ **En cours de charge, la tension évolue de la façon suivante :**

1,64 V pour un élément dont la capacité est comprise entre 0 et 30 % de sa valeur nominale ;

1,90 à 2,00 V pour un élément dont la capacité est comprise entre 30 et 90 % de sa valeur nominale ;

2,00 à 2,15 V pour un élément dont la capacité est comprise entre 90 et 100 % de sa valeur nominale.

Le diagramme de la *figure* 34 indique dans quelles limites peut varier le courant en fonction de la tension mesurée aux bornes des éléments.

Il résulte de la forme du diagramme de charge qu'une batterie argent-zinc doit être chargé sous une tension suffisante. Si la tension est trop basse, certains éléments vont passer du premier au deuxième palier de charge, mais lorsque la tension totale de la batterie sera égale à la tension disponible aux bornes du générateur de charge, les éléments qui sont restés à leur premier palier ne pourront le franchir et se surchargeront sans pour autant emmagasiner de l'énergie.

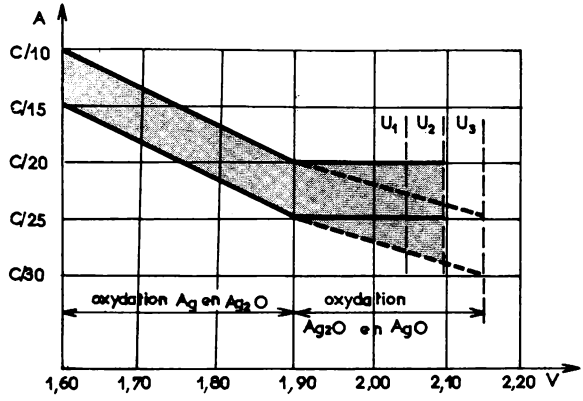


Fig. 34.

Le danger de surcharge conduit également à ne pas faire fonctionner la batterie en tampon, du moins en permanence. En effet, lorsque la charge est terminée, l'intensité peut se stabiliser à une valeur faible, mais suffisante pour surcharger les éléments.

Il résulte de toutes les considérations qui précèdent que la charge doit être effectuée de préférence avec un appareillage automatique, dont la caractéristique de charge ne s'éloigne pas trop de la caractéristique des éléments, et qui coupe le courant lorsque la tension de fin de charge est atteinte.

Il est également possible de charger à intensité constante, à C/20 environ.

◆ **La température ambiante doit être comprise entre + 15 et + 40 °C.**

Toute charge effectuée en dehors de ces limites risque d'amener une baisse sensible des performances.

5.37. — ENTRETIEN ET CONSERVATION

Il est absolument nécessaire d'assurer les deux conditions suivantes :

— charge suffisante, suivant les critères déjà définis ;

— décharge des éléments, au moins une fois par mois, à une intensité d'autant plus élevée qu'il s'agit d'éléments à décharge plus rapide ou débitant normalement des pointes de courant.

Le stockage prolongé sans débit n'est possible que pour des éléments à l'état sec.

La conservation à l'état chargé nécessite, comme indiqué ci-dessus, une décharge périodique suivie d'une charge et diminue ainsi la vie utile de l'élément.

5.4. — CHOIX D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

Le choix ne peut être effectué que lorsqu'on a défini toutes les conditions de fonctionnement, d'entretien, de durée de vie, d'encombrement et de prix. Nous rappellerons simplement les principales caractéristiques des différents accumulateurs :

— *Argent-zinc* : capacités massique et volumique élevées, prix très élevé, durée de vie relativement courte (environ le dixième des batteries au plomb). Principales applications : appareils portatifs, engins spatiaux et missiles.

— *Cadmium-nickel et fer-nickel* : capacité volumique comparable aux batteries au plomb (supérieure pour les éléments à plaques frittées), prix élevé, durée de vie très longue (la garantie est de dix ans sur certains types). Peuvent satisfaire à tous les usages si le choix est correct. Entretien réduit ; peuvent supporter des décharges et charges à des régimes très élevés ; ne nécessitent pas de locaux spécialement aménagés.

— *Plomb-oxyde de plomb* : prix réduit. Elles s'utilisent pour l'équipement des automobiles de tourisme, les chariots électriques et quelques installations fixes. Leur durée de vie, intermédiaire entre celle des batteries à l'argent et celle des batteries au nickel, dépend pour une grande part de l'entretien qui leur est assuré.

5.5. — INSTALLATION DES ACCUMULATEURS FIXES

Les considérations suivantes intéressent seulement les installations importantes comportant au moins plusieurs dizaines d'éléments de grande capacité.

5.51. — ACCUMULATEURS ALCALINS AU NICKEL

Pour ce type d'accumulateur, il n'y a pas lieu de prévoir une salle spéciale. Il suffit simplement d'assurer une ventilation suffisante, surtout en fin de charge, afin d'évacuer les gaz inflammables qui se dégagent. On évitera également les locaux dont l'air peut être chargé de gaz carbonique en raison de son action sur l'électrolyte.

Afin d'assurer une bonne isolation de la batterie par rapport au sol, les éléments sont disposés sur des isolateurs en porcelaine ou en verre. Ces isolateurs reposent eux-mêmes sur des chantiers en bois isolés du sol par d'autres isolateurs en porcelaine à bain d'huile. Afin de faciliter les opérations de contrôle et d'entretien, la hauteur de l'ensemble est de l'ordre de 1 mètre.

5.52. — ACCUMULATEURS AU PLOMB

Les prescriptions sont assez strictes en raison de l'atmosphère acide qui accompagne une installation importante. Il est nécessaire de prévoir un local spécialement aménagé répondant aux conditions suivantes :

— *absence d'humidité* ;

— *température sensiblement constante et pas trop basse* à cause de son influence sur la capacité ;

— *absence de poussières* ;

— *aération intense* ;

— *insensibilité du sol et des murs à l'acide.*

Les éléments sont isolés du sol par l'intermédiaire de chantiers en bois et d'isolateurs (*fig.* 35). Le sol est réalisé en briques anti-acides, ou recouvert d'une chape de bitume. Les murs, le plafond et les parties métalliques, s'il en existe, sont recouverts d'une peinture bitumeuse.

La salle ne doit contenir que les accumulateurs à l'exclusion de tout autre appareillage.

Pour toutes ces raisons, les batteries au plomb sont souvent abandonnées, dans les installations modernes, au profit des batteries alcalines au nickel.

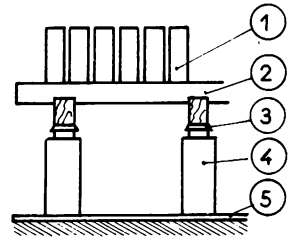


Fig. 35.

1. Elément.
2. Chantier.
3. Isolateur.
4. Muret.
5. Chape bitume.

5.53. — APPAREILLAGE ASSOCIÉ AUX ACCUMULATEURS

La nature et la fonction des appareils associés sont différentes suivant la complexité de l'installation.

Outre l'appareillage traditionnel — appareils de mesure, appareils de commande, appareils de réglage — on rencontre fréquemment deux appareils particuliers à ces installations :

— compteur ampère-heure-mètre qui permet le contrôle permanent de l'état de charge ou de décharge de la batterie ;

— appareillage automatique prévu pour assurer une charge permanente ou une charge périodique.

5.6. — APPLICATIONS DES ACCUMULATEURS

Elles sont très diverses, mais on peut les classer en quelques grandes familles.

— **Démarrage des moteurs thermiques** : automobiles, autorails, avions, hélicoptères.

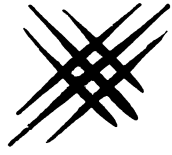
— **Traction et propulsion électrique** : chariots de manutention, camions à service urbain, sous-marins.

— **Alimentation en secours d'installations diverses** : éclairage, signalisation, téléphonie.

Dans ce cas, les accumulateurs sont généralement reliés en permanence au secteur et c'est seulement en cas de panne qu'ils sont appelés à débiter.

— **Alimentation en permanence d'appareils autonomes** : signalisation, appareils de radio portatifs, enregistrement acoustique, appareils de surdité, prises de vues photographiques et cinématographiques, engins spatiaux, clôtures électriques, horloges électriques.

— **Eclairage des wagons de voyageurs dans les trains.**



6. Notions sommaires sur les piles à combustibles.

6.1. — PRINCIPE.

La combustion d'un corps dans l'oxygène conduit à une oxydation avec une nouvelle disposition des atomes du combustible et du comburant. La chaleur accompagnant le phénomène de combustion correspond à l'énergie libérée par cette nouvelle disposition des atomes. Les électrons libérés sont assimilables à un courant de court circuit entre atomes.

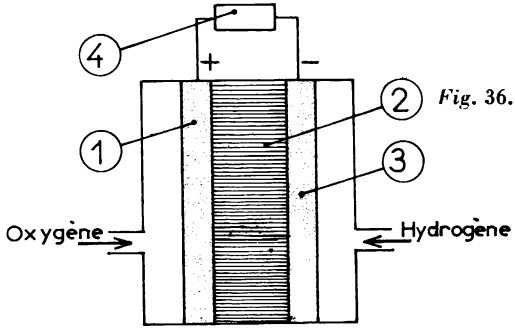


Fig. 36. — Principe de la pile à combustible.

1. Anode poreuse.
2. Electrolyte.
3. Cathode poreuse.
4. Circuit d'utilisation.

Si on sépare le combustible et le comburant par un électrolyte, l'oxydation du combustible ne pourra se produire que par des ions ayant traversé l'électrolyte (*fig.* 36). Ainsi par exemple, si on utilise de l'hydrogène, on aura les réactions suivantes :

Sur l'électrode négative ou à combustible, recevant l'hydrogène :

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-.$$

Les électrons libérés passent dans le circuit extérieur et parviennent sur l'électrode positive, tandis que les cations H^+ se combinent avec les anions OH^-

en provenance de l'électrode positive à travers l'électrolyte :

$$2H^+ + 2OH^- \dashrightarrow H_2O + H_2O.$$

Des deux molécules d'eau formées, une est libérée, une atteint l'électrode positive à travers l'électrolyte.

Sur l'électrode positive ou à comburant, recevant l'oxygène :

$$\frac{1}{2}\,O_2 + 2e^- \dashrightarrow \frac{1}{2}\,O_2^{--}$$

$$\frac{1}{2}\,O_2^{--} + H_2O \longrightarrow 2OH^-$$

En définitive, la réaction globale s'écrira :

$$H_2 + \frac{1}{2}\,O_2 = H_2O.$$

Du point de vue thermodynamique, le rendement de la pile peut être théoriquement égal à l'unité, mais en pratique, il peut s'abaisser à 0,4 ou 0,5 (1).

6.2. — FORCE ÉLECTRO-MOTRICE.

Elle dépend en première approximation :

— de la nature des éléments actifs ;

— de la température à laquelle se produisent les réactions ;

— de la pression d'alimentation des gaz.

Sa valeur est toujours faible, de l'ordre du volt.

6.3. — IMPORTANCE DES ÉLECTRODES.

On compare, assez souvent, une pile à combustible à une cellule d'électrolyse dont le fonctionnement serait inversé. Si cette comparaison permet de comprendre facilement le principe de production du courant, elle conduit à des idées fausses en ce qui concerne la constitution des électrodes.

Une étude un peu plus détaillée montre que le débit de courant électrique ne se produit que dans les zones des électrodes où il y a présence simultanée des trois phases, solide (électrode), liquide (électrolyte), gazeuse (combustible ou comburant).

---

(1) En réalité, le rendement théorique dépend des échanges de chaleur avec le milieu extérieur. Si la pile cède de la chaleur à l'extérieur, le rendement théorique est inférieur à l'unité ; si, au contraire, elle emprunte de la chaleur au milieu extérieur, elle fonctionne en pompe de chaleur et le rendement théorique peut être supérieur à l'unité, comme par exemple dans l'oxydation du carbone en oxyde de carbone CO.

Cette nécessité du triple contact simultané pose des problèmes technologiques extrêmement difficiles à résoudre. Pour obtenir une surface de contact appréciable, il est nécessaire de faire appel à des électrodes poreuses, en contact, d'un côté avec l'électrolyte, de l'autre côté avec le combustible ou le comburant. De plus, elles doivent assurer la dissociation du combustible sous une forme électro-chimiquement active, d'où la nécessité de faire appel à des catalyseurs.

Des phénomènes de polarisation viennent encore compliquer le fonctionnement.

6.4. — DIFFÉRENTS TYPES DE PILES

On peut effectuer une classification des piles à combustibles d'après plusieurs critères : température de fonctionnement, nature de l'électrolyte, nature du combustible, possibilités de régénération des produits apparaissant dans le fonctionnement de la pile. En utilisant ce dernier caractère on est amené à distinguer :

— les *piles primaires*, qui fonctionnent jusqu'à épuisement des éléments actifs, combustible et comburant ;

— les *piles secondaires* ou régénérables, dans lesquelles les produits actifs sont régénérables à partir des produits de réaction, par l'intervention d'une source d'énergie qui peut être : chimique, thermique, nucléaire, lumineuse, électrique ;

— les *piles indirectes*, dans lesquelles on ne brûle pas directement le combustible par le comburant, mais en utilisant des réactions chimiques intermédiaires qui permettent la génération du courant. Une solution oxydo-réductrice est oxydée sur une électrode, puis régénérée à part par l'action du combustible. La même solution est réduite sur l'autre électrode puis régénérée à part par l'action du comburant.

6.5.— INTÉRÊT DES PILES A COMBUSTIBLES.

Des travaux de recherche importants sont entrepris sur les piles à combustibles. L'espoir des chercheurs réside surtout dans le fait que la transformation de l'énergie chimique contenue dans le combustible en énergie électrique, se fait directement. Dans les usines thermiques classiques, la production d'électricité, à partir de combustibles, fait, au contraire, intervenir plusieurs transformations :

— *transformation en énergie thermique* à l'intérieur de la chaudière ;

— *transformation de la chaleur en énergie mécanique* dans la turbine ;

— *transformation de l'énergie mécanique* en énergie électrique dans l'alternateur.

On sait que le rendement de la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique est limité par le principe de Carnot suivant la formule :

$$\eta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2}$$ en appelant

θ_2 : température absolue à la source chaude ;

θ_1 : température absolue à la source froide.

Apparemment, le principe même de la pile à combustible échappe au principe de Carnot, ce qui doit, théoriquement, entraîner des rendements élevés.

Les travaux entrepris n'ont toutefois par encore abouti à la mise au point d'une pile utilisable dans les installations industrielles. Les solutions technologiques, le choix des fluides en sont encore au stade de la recherche fondamentale. Les rares réalisations effectuées visent à des applications très spéciales pour lesquelles le prix de revient et la complexité de l'installation ne sont pas pris en considération.

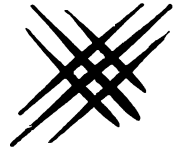


TABLE DES MATIÈRES

PREMIER LIVRE

Machines électriques

Pages

PREMIÈRE PARTIE : *construction de machines.*

1. **Machines tournantes** 9
1.1 Constitution générale 9
1.2 Organes mécaniques 13
1.3 Circuits magnétiques 28
1.4 Circuits électriques 49
1.5 Organes de prise de courant 69
1.6 Refroidissement 79
1.7 Machines de construction spéciale 100
1.8 Moteurs freins 107
1.9 Machines à flux axial 109
1.10 Groupes bulbes 112

2.5 **Transformateurs** 119
2.1 Constitution générale 119
2.2 Circuit magnétique 129
2.4 Système de refroidissement 151
2.5 Traversées 160
2.6 Organes divers 163
2.7 Rendement et caractéristiques de fonctionnement 163

DEUXIÈME PARTIE : *étude des schémas de bobinage* 169

1. **Conventions de représentation graphique et terminologie** 170
1.1 Représentation des conducteurs 170

2. **Conditions générales d'établissement des schémas** 175
2.1 Enroulements inducteurs sur pôles saillants 175
2.2 Enroulements fermés sans collecteurs placés dans des encoches 176
2.3 Enroulements fermés sur collecteur 186

Pages

3. **Exemples d'application** 209
3.1 Enroulements sans collecteur 209
3.2 Enroulements d'induits à collecteur 232

TROISIÈME PARTIE : *traction électrique* 245

1. **Traction des trains** 246
1.1 Etude mécanique d'une machine motrice 246
1.2 Moteur 262
1.3 Equipement d'une locomotive 282
1.4 Installations fixes 317

2. **Trolleybus** 331
2.1 Equipement mécanique 331
2.2 Equipement électrique 331
2.3 Alimentation en énergie 342
2.4 Etude critique de la traction par trolleybus 345

3. **Camions électriques** 347
2.1 Organisation mécanique 347
3.2 Organisation électrique 348
3.3 Performances et utilisation 352

4. **Chariots de manutention** 355
4.1 Organisation générale 355
4.2 Performances et utilisation des chariots 360

QUATRIÈME PARTIE : *générateurs d'électricité d'origine électrochimique* 363

1. **Rappel de notions théoriques** 364
1.1 Phénomènes de polarisation 366
1.2 Caractéristiques électriques 366

2. **Piles primaires** 369
2.1 Pile du type Leclanché 369
2.2 Pile au mercure 373
2.3 Piles alcalines zinc-manganèse 374

3. **Piles amorçables** 379
3.1 Pile au chlorure d'argent-magnésium 379
3.2 Pile au chlorure cuivreux-magnésium 380
3.3 Pile à l'oxyde d'argent-zinc 380

4. **Choix d'une pile** 381
4.1 Performances 381
4.2 Conservation 384
4.3 Etanchéité 384

Pages

5.	**Accumulateurs**	387
5.1	Accumulateurs au plomb	387
5.2	Accumulateurs alcalins	408
5.3	Accumulateurs argent-zinc	425
5.4	Choix d'une batterie d'accumulateurs	430
5.5	Installation des accumulateurs fixes	430
6.	**Notions sommaires sur les piles à combustibles**	433
6.1	Principe	433
6.2	Force électromotrice	434
6.3	Importance des électrodes	434
6.4	Différents types de piles	435
6.5	Intérêts des piles à combustibles	435

FOUCHER

En vente

ÉLECTRICITÉ

P. HEINY — **Technologie professionnelle générale** tome 1

HEINY et DENOJEAN — **Technologie professionnelle pratique** tome 2

HEINY et NAUDY — **Technique de l'appareillage et ses applications** tome 3

HEINY, NAUDY, DARÉES — **Applications de l'énergie électrique** tome 4

HEINY et LE GARFF — **Normes et schémas d'électricité**

P. HEINY — **Projets d'équipements électriques**

AUTOMATISATION

P.-J. FORT — **Techniques simples d'automatisation**

CAMPA, CHAPPERT, COJEAN — **L'automatique par les problèmes**

le Livre au service du Métier...

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli — PARIS (1er)
N° 2381-667

IMPRIMÉ EN FRANCE

Imprimerie
CHAIX-DESFOSSÉS-NÉOGRAVURE
PARIS - 42172
Dépôt légal : 2e trim. 1967 - n° 101